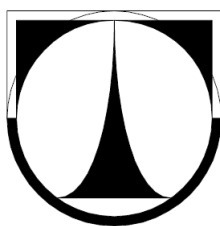


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2010

Martin Plachý

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program:

B2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

2612R011 Elektronické informační a řídicí systémy

Konstrukce tranzistorového kytarového komba pro začínající hudebníky

Construction of a transistor based guitar combo amplifier for beginning players

Bakalářská práce

Autor:

Martin Plachý

Vedoucí práce:

Ing. Jan Václavík

V Liberci, dne 21. 5. 2010

!!!ZDE SE VLOŽÍ ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ PRÁCE!!!

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval panu Ing. Janu Václavíkovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za cenné rady a vstřícné jednání. Rovněž bych chtěl poděkovat Bc. Kamilu Polákovi, který věnoval svůj volný čas zodpovídání mých otázek.

V neposlední řadě bych chtěl projevit vděčnost rodičům za podporu, díky které tato bakalářská práce mohla být realizována. A na závěr velké díky Magdaleně Hájkové za to, že je a že nedopustila, abych sešel z cesty.

Abstrakt

Tato bakalářská práce podává teoretické a praktické informace o konstrukci kytarového kombo zesilovače určeného pro začínající hudebníky.

Nejprve jsou přehledně vysvětleny základní parametry nízkofrekvenčního zesilovače, reproduktorů a ozvučnic. Stěžejní část práce popisuje elektronické obvody předzesilovače, ekvalizéru a světelné indikace. Každý funkční blok je realizován více způsoby a jeho výhody a nevýhody jsou uvedeny.

V zapojeních se využívají diskrétní součástky i integrované obvody, speciálně operační zesilovače NE5532 AP. Problémy nízké vstupní impedance a rozdílné vstupní citlivosti předzesilovače jsou řešeny v dostatečném rozsahu.

Je popsán princip tvarování signálu a zapojení zkreslujícího kanálu podle obvodu efektu Big Muff od firmy Electro-Harmonix. Výpočty filtrů ekvalizéru vycházejí ze zapojení aktivní pásmové propusti 2. řádu podle Huelsmana.

Při konstrukci komba se využívá jednodeskový výkonový zesilovač. Text srovnává výkonové zesilovače dvou různých výrobců.

Tato bakalářská práce v menší míře popisuje také konstrukci neelektrických částí, tj. šasi a ozvučnice. Způsoby spojování částí ozvučnice, vhodnost materiálu a povrchová a estetická úprava jsou také vysvětleny.

Poslední část se věnuje měření elektrických parametrů a zhodnocuje úspěšnost konstrukce.

Klíčová slova: kytara, kombo, zesilovač, ekvalizér, zkreslení

Abstract

This bachelor thesis contains theoretical and practical information about the construction of a guitar combo amplifier for beginning players.

At first well-arranged basic parameters of low-frequency amplifier, loudspeakers and guitar speaker cabinets are explained. The pivotal part considers electronic circuits of amplifier, equalizer and light indication. Every function block is carried out by several ways. Their advantages and disadvantages are mentioned.

Discreet parts and integrated circuits, especially operational amplifiers NE5532 AP, are used in a wiring. Problems of a low input impedance of preamplifier and the power matching of a power amplifier and a loudspeaker are solved in a sufficient range.

The method of the signal distortion and the wiring of distorting channel according to the Big Muff effect circuit produced by the Electro-Harmonix company is described. The filter calculation corresponds to the second-order active band-pass circuit (Huelsman).

A single-board power amplifier is used during the combo amplifier constructing. The text compares power amplifiers of two companies.

This bachelor thesis also describes a construction of non-electric parts, i.e. a chassis and a guitar speaker cabinet. Techniques of cabinet parts joining, used materials and a surface treatment are described too.

The last part contains electric measurement results and the construction evaluation.

Keywords: guitar, combo, amplifier, equalizer, distortion

Obsah

Original zadání práce	2
Prohlášení	3
Poděkování	4
Abstrakt	5
Seznam obrázků	8
Seznam symbolů, zkratk a termínů	9
Úvod	11
1 Popis kytarového komba	12
1.1 Blokové schéma	12
1.2 Přehled parametrů	13
1.3 Nízkofrekvenční zesilovač	14
1.4 Reproduktor	16
1.5 Ozvučnice	18
1.6 Technické parametry	20
2 Realizace elektrických obvodů	21
2.1 Předzesilovač	21
2.1.1 Přepínání vstupní citlivosti a impedanční přizpůsobení	21
2.1.2 Filtrace nežádoucích signálů	24
2.1.3 Zkreslující kanál	25
2.1.4 Indikace provozních stavů	27
2.2 Ekvalizér	29
2.2.1 Pásmové propusti	29
2.2.2 Korekční obvody	31
2.3 Výkonový zesilovač	32
3 Realizace mechanických částí	36
3.1 Šasi	36
3.2 Ozvučnice	37
3.3 Reproduktor	39
4 Měření parametrů zkonstruovaného zařízení	40
4.1 Průběhy zkreslených signálů	40
4.2 Naměřené parametry kytarového zesilovače	41

Závěr	44
A Úplná schémata zapojení	45
A.1 Předzesilovač	45
A.2 Ekvalizér	46
B Předlohy DPS	47
B.1 Předzesilovač	47
B.2 Ekvalizér	49
C Osazovací výkresy	51
C.1 Předzesilovač	51
C.2 Ekvalizér	52
D Soupisky součástek	53
Literatura	56

Seznam obrázků

1.1	Blokové schéma kytarového komba	13
1.2	Schéma elektrodynamického reproduktoru	16
1.3	Frekvenční charakteristika reproduktoru Legend 1518	18
1.4	Frontman TM 65R	19
1.5	Kustom [®] KG1	19
2.1	Nevhodná zapojení přepínačů vstupní citlivosti do záporné zpětné vazby	22
2.2	Zapojení přepínače vstupní citlivosti s děličem napětí nebo potenciometrem	23
2.3	Zapojení přepínače vstupní citlivosti s dvěma OZ	23
2.4	Pasivní HP a DP 1. řádu na vstupu a výstupu předzesilovače	24
2.5	Antiparalelní zapojení diod pro tvarování signálu ve zpětné vazbě a výstupu OZ	25
2.6	Simulace průběhů zkreslených signálů v závislosti na zapojení diod	26
2.7	Obvod tvarovacích stupňů s tónovým korektorem efektu Big Muff	27
2.8	Zapojení obvodu LED diody do napájecí cesty primárního vinutí	28
2.9	Realizace současného přepínání kanálů a indikace	28
2.10	Schéma PP RLC 2. řádu	29
2.11	Schéma PP ARC 2. řádu s 1 OZ podle Huelsmana	30
2.12	Principiální schéma ekvalizéru s 1 OZ	31
2.13	Principiální schéma ekvalizéru s 2 OZ	32
2.14	Deska výkonového zesilovače KSX9901	34
2.15	Deska výkonového zesilovače SPV 100P215+	35
3.1	Nákres šasi bez bočních stěn	36
3.2	Nákres šasi jako uzavřené krabíčky	37
3.3	Způsoby spojení desek	37
3.4	Nákres ozvučnice s čelním a vrchním ovládacím panelem	38
3.5	Reproduktor Legend 1058 od firmy Eminence	39
4.1	Průběh zkresleného signálu 1	42
4.2	Průběh zkresleného signálu 2	42
4.3	Průběh zkresleného signálu 3	43
4.4	Průběh zkresleného signálu 4	43
A.1	Schéma dvoukanálového předzesilovače	45
A.2	Schéma třípásmového ekvalizéru	46
B.1	Předloha vrchní strany DPS předzesilovače (měřítko 1:1)	47
B.2	Předloha spodní strany DPS předzesilovače (měřítko 1:1)	48
B.3	Předloha vrchní strany DPS ekvalizéru (měřítko 1:1)	49
B.4	Předloha spodní strany DPS ekvalizéru (měřítko 1:1)	50
C.1	Osazovací výkres DPS předzesilovače (měřítko 1:1)	51
C.2	Osazovací výkres DPS ekvalizéru (měřítko 1:1)	52

Seznam symbolů, zkratek a termínů

A_I	Zesílení invertujícího zapojení operačního zesilovače
A_N	Zesílení neinvertujícího zapojení operačního zesilovače
A_U	Zesílení operačního zesilovače (bez zpětné vazby)
ARC	Aktivní filtr (zapojení operačních zesilovačů, rezistorů a kondenzátorů)
B	Bandwidth (šířka pásma)
C_n	Obecné označení kondenzátoru nebo hodnoty jeho kapacity
D_n	Obecné označení diody
DP	Dolní propust
DPS	Deska plošných spojů
EBP	Efficiency Bandwidth Product
f_n	Obecné označení frekvence
f_r	Rezonanční frekvence
G_n	Obecné označení vodivosti rezistoru
HP	Horní propust
K_{PP}	Přenos pásmové propusti (s použitím děliče napětí)
$K_{U_{max}}$	Maximální přenos korektoru
$K_{U_{min}}$	Minimální přenos korektoru
$K(f_r)$	Přenos filtru ARC bez použití děliče napětí
K	Činitel harmonického zkreslení
L_n	Obecné označení cívky nebo hodnoty její indukčnosti
\log	funkce dekadický logaritmus
OZ	Operační zesilovač
p_0	Referenční hladina akustického tlaku
P_{in}	Příkon zesilovače
P_n	Obecné označení potenciometru nebo hodnoty jeho odporu
P_{noise}	Výkon šumového signálu
P_{out}	Výstupní výkon zesilovače
P_{signal}	Výkon užitečného signálu
P	Výkonová zatížitelnost reproduktoru
PP	Pásmová propust
Q	Činitel jakosti filtru
R_n	Obecné označení rezistoru nebo hodnoty jeho odporu
R_s	Vnitřní odpor hudebního nástroje
RLC	Pasivní filtr (zapojení rezistorů, cívek a kondenzátorů)

RMS	Root mean square (efektivní hodnota)
S_{in}	Vstupní citlivost předzesilovače
S_{inH}	Vstupní citlivost předzesilovače vyšší
S_{inL}	Vstupní citlivost předzesilovače nižší
SNR_{dB}	Signal-to-Noise Ratio (odstup rušivých napětí, poměr signál/šum)
S_P	Vstupní citlivost výkonového zesilovače
SPL_{max}	Maximální hladina akustického tlaku
SPL	Sound Pressure Level (charakteristická citlivost reproduktoru)
SR	Slew rate (rychlost přeběhu)
T_n	Obecné označení tranzistoru
THD	Total Harmonic Distortion (celkové harmonické zkreslení)
U_{CC}	Napětí napájecí
U_{gen}	Efektivní hodnota napětí signálu z generátoru funkcí
U_N	Napětí pracovní
U_n	Obecné označení efektivní hodnoty napětí
U_{noise}	Efektivní hodnota napětí šumového signálu
U_{sat}	Napětí saturační
U_{signal}	Efektivní hodnota napětí užitečného signálu
X_{Ls}	Induktivní reaktance hudebního nástroje (cívek snímačů)
Z_{in}	Vstupní impedance předzesilovače
Z_{nom}	Jmenovitá impedance reproduktoru
Z_s	Výstupní impedance hudebního nástroje
Z	Impedance reproduktoru
Z_{out}	Výstupní impedance výkonového zesilovače

Úvod

Kytarové kombo je možné obecně definovat jako elektrické zařízení, které upravuje a zesiluje elektrický signál, přiváděný zpravidla z elektrofonické kytary na vstup, a následně ho akusticky reprodukuje.

Řešení a konstrukce kytarového komba, které je předmětem této bakalářské práce, by mělo vycházet z níže nastíněné podoby zařízení, protože nejvíce vyhovuje začínajícímu hudebníkovi.

Důraz se klade spíše na kvalitu reprodukováného zvuku a možnosti použití, než na přítomnost kytarových efektů nebo výkonové vlastnosti. Kvalita vnímaného zvuku zajistí větší rozmanitost při studiu různých stylů hry a delší použitelnost, jelikož kytarista nebude nucen měnit své zařízení za kvalitnější.

Zařízení se v České republice napájí standardním fázovým napětím (230V/50Hz), spadá do třídy ochrany I a musí vyhovovat elektrotechnickým normám (relevantnímu výběru z třídy ČSN 33). Zpravidla se konstruuje jako skříň, tzv. ozvučnice, ve které je uložen nízkofrekvenční zesilovač a elektroakustický měnič – reproduktor. Na vrchu nebo čelu ozvučnice se umísťuje panel s vyvedeným ovládáním, funkčně a esteticky odlišným u každého výrobce.

Vypínač, kytarový vstup a regulace hlasitosti tvoří naprostý základ, často doplněný ovládáním ekvalizéru. Přepínání mezi čistým a zkreslujícím kanálem a přítomnost vícekanálového zesilovače je rovněž vlastní levnějším modelům.

Vlastnosti zařízení konstruovaného v rámci této bakalářské práce budou samozřejmě limitovány finančně a to tak, aby výsledek práce byl vzhledem k vynaloženým peněžním prostředkům co možná nejuspokojivější.

Kapitola 1

Popis kytarového komba

Seznámení s vnitřním uspořádáním a vlastnostmi kytarového komba je náplní první kapitoly. Vzhledem k faktu, že kytarové kombo slouží k reprodukci zvuku a jeho kvalita je závislá nejen na elektrických vlastnostech zesilovače, je vhodné uvést také parametry neelektrické.

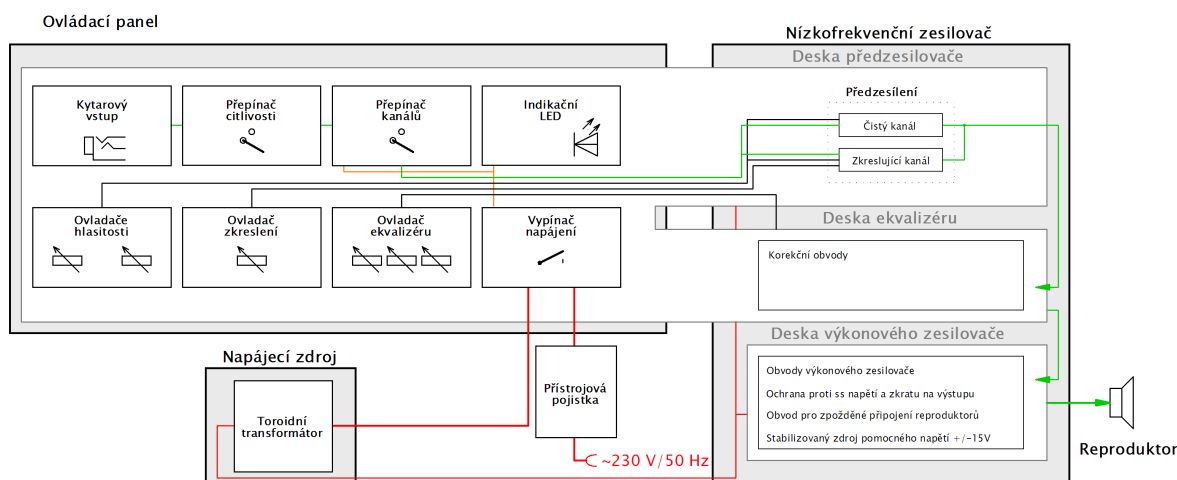
Zároveň je však nutné si uvědomit, že praktická orientace této bakalářské práce do jisté míry znemožňuje vyčerpávající popis všech parametrů zařízení, které větší i menší měrou ovlivňují výsledný zvuk, a proto se představení kytarového komba omezí na výčet a podrobnější popis těch nejdůležitějších.

Nesmí se také zapomínat, že kytarové kombo z hlediska složitosti funkčních bloků je například ve srovnání se zesilovači reproduktorových soustav mnohem jednodušší a parametry, které se u nich uplatňují, například činitel tlumení hlubokotónových reproduktorů, zde nemají přílišný vliv.

1.1 Blokové schéma

Napájecí cesty jsou v blokovém schématu z obrázku 1.1 značeny červeně a signálové zeleně. Jen pro názornost je odlišeno také zapojení LED diod.

Zdroj tvořený toroidním transformátorem poskytuje elektrickou energii všem funkčním blokům. Kytarový vstup je přes přepínače citlivosti a kanálů připojen k předzesilovači a dále ekvalizéru. Následuje výkonový zesilovač a reproduktor. Potenciometrické ovládání hlasitosti, zkreslení a nastavení filtrů ekvalizéru je vyvedeno na vnější panel spolu s indikačními LED diodami a vypínačem napájení.



Obrázek 1.1: Blokové schéma kytarového komba

1.2 Přehled parametrů

Parametry zařízení jsou v tabulce 1.1 rozděleny do dvou velkých skupin podle fyzikálního charakteru a řazeny abecedně. Písmeno v závorce značí funkční blok, pro který je vlastnost typická:

- (Z) - zesilovač
- (R) - reproduktor
- (O) - ozvučnice

Dále se rozlišuje důležitost. Tučně jsou zvýrazněny takové parametry, které budou dále hlouběji popsány. Vlastnosti tištěné normálním písmem také ovlivňují kytarové komba, z důvodu úspory místa však budou vynechány. Parametry, které jsou pro případ kytarového komba nezajímavé, jsou značeny italikem.

Parametry	
Elektrické:	Neelektrické (mechanické a akustické):
Citlivost vstupní (Z), charakteristická (R)	Činitel jakosti mechanický (R)
Činitel jakosti elektrický (R), Činitel tlumení (R)	EBP (O), <i>Faktor akcelerační</i> (R)
Činitel zkreslení harmonického (Z)	Frekvence rezonanční (R)
Činitel zkreslení intermodulačního (Z)	Hmotnost (O), Hmotnost systému kmitacího (R)
Dynamika (Z), <i>Faktor silový</i> (R)	Objem (O), Objem ekvivalentní (R)
Charakteristika frekvenční (R) (Z), směrová (R)	Plocha/průměr membrány (R)
Impedance jmenovitá (R), vstupní/výstupní (Z)	Poddajnost závěsu (R), Rozměry (O)
Indukčnost cívky (R), Odpor cívky stejnosměrný (R)	Tlak akustický maximální (R)
Odstup rušivých napětí (Z), Přeslechy (Z)	Typ (O), <i>Úbytek gravitační</i> (R)
Šířka pásma výkonová (Z), Účinnost (R)	Výchylka membrány maximální povolená (R)
Výkon výstupní (Z), Zatížitelnost výkonová (R)	

Tabulka 1.1: Tabulka parametrů kytarového komba

1.3 Nízkofrekvenční zesilovač

Za zesilovač napětového signálu, jehož zdrojem je hudební nástroj, se v této bakalářské práci bude považovat trojice elektrických obvodů zrealizovaných na třech deskách plošných spojů (DPS). Předzesilovač, jehož hlavní funkcí je zesílení signálu na patřičnou úroveň, bude umístěn na desce první, ekvalizér pro korekci frekvenční charakteristiky na druhé a výkonový zesilovač na třetí desce (viz obrázek 1.1).

Vstupní citlivost předzesilovače S_{in} odpovídá minimální napětové hodnotě signálu, který je třeba generovat elektrofonickou kytarou, aby se na jeho výstupu dosáhlo požadovaného jmenovitého napětí¹, odpovídajícího vstupní citlivosti výkonového zesilovače S_P .

Výstupní výkon zesilovače P_{out} by měl být uváděn jako tzv. výkon sinusový (RMS nebo trvalý). Ten se definuje jako výkon, který může zesilovač trvale dodávat do zátěže (různé příručky udávají různé časové hodnoty v řádu desítek minut až stovek hodin), při buzení sinusovým signálem o frekvenci 1 kHz a při dodržení jmenovitého činitele harmonického zkreslení².

Lze se setkat i s tzv. hudebním výkonem (špičkovým). Ten vyjadřuje krátkodobé výkonové vlastnosti zesilovače (v řádu sekund), a proto může nabývat vyšších hodnot než výkon trvalý. Z hlediska objektivního posouzení je vhodnější upřednostňovat výkon sinusový (RMS).

¹Jestliže se na vstup přivede signál o napětové hodnotě menší než vstupní citlivost, zmenšuje se poměr signál/šum.

²Zatěžovací impedance by se měla uvádět vedle výstupního výkonu z důvodu impedančního přizpůsobení.

Aby nedocházelo k přetěžování obvodu kytary, což by vedlo ke změně frekvenční charakteristiky, zkreslení a zmenšení poměru signál/šum, musí se vstup předzesilovače impedančně přizpůsobit. Poměr mezi **vstupní impedancí** předzesilovače Z_{in} a výstupní impedancí hudebního nástroje Z_s se udává 5:1 až 10:1 [1].

Mezi **impedancí výstupu** zesilovače Z_{out} a reproduktoru Z nastává obdobná situace. Bez impedančního přizpůsobení hrozí:

1. Přetěžování zesilovače a reproduktoru, pokud $Z_{out} > Z$
2. Tlumení výstupního signálu, jestliže $Z_{out} < Z$

Činitel harmonického zkreslení³ K stanovuje, jaká část harmonického signálu představuje vyšší harmonické, zesilovačem vytvořené složky.

$$K = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.1)$$

U_1 je efektivní hodnota zesilovaného harmonického signálu a $U_{2...n}$ jsou efektivní hodnoty vyšších harmonických složek. K je závislý na velikosti výstupního napětí (případně výkonu) a na frekvenci [1]. Celkové harmonické zkreslení THD (Total Harmonic Distortion) se určí geometrickým (ne aritmetickým!) součtem zkreslení jednotlivých členů přenosového řetězce.

$$THD = \sqrt{K_1^2 + K_2^2 + \dots + K_n^2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

Odstup rušivých napětí SNR_{dB} se vyjadřuje pomocí logaritmicky vzatého poměru mezi maximálním užitečným signálem a parazitním, rušivým signálem (označováno jako SNR , Signal-to-Noise Ratio, poměr signál/šum).

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{U_{signal}}{U_{noise}} \right) \quad [dB] \quad (1.3)$$

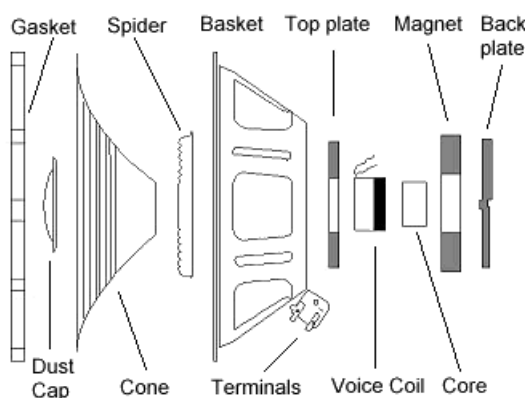
Šumové signály vznikají ve vnějším prostředí (vlivem elektromagnetické indukce polí z elektrických rozvodných sítí, vysílačů apod.) nebo ve vnitřním prostředí samotného obvodu (kvůli fyzikálním vlastnostem použitých součástek). SNR_{dB} je závislý na konkrétním zapojení a vlastnostech zesilovače a platí, že nejprůzračnější poměr signál/šum se uplatní při plném využití jmenovitých výstupních hodnot [1].

³Rozlišujeme **lineární** zkreslení, které znemožňuje věrnou reprodukci amplitudy signálu, ale jeho frekvenční spektrum neovlivňuje, a **nelineární** zkreslení, měnící amplitudu i spektrum frekvencí. Harmonické zkreslení je nelineární. Nelineární charakteristiky zesilovacích prvků, jejich přebuzení a špatné nastavení pracovních bodů mohou za nelineární zkreslení [1].

1.4 Reproduktor

Zařízení, která převádí elektrickou energii na akustickou, se jmenují elektroakustické měniče. Dělí se na dvě velké skupiny podle směru, jakým je převod realizován. **Mikrofony** převádí akustické vlny na elektrický signál a **reproduktory** činí to samé opačně.

Hudební reproduktory jsou v drtivé většině elektrodynamické⁴. Modelové ústrojí sestává především z permanentního magnetu a pólových nástavců, cívkového tělesa, kmitací cívky a membrány a ukládá se do pevného plechového nebo odlévaného koše (viz obrázek 1.2).



Obrázek 1.2: Schéma elektrodynamického reproduktoru [14]

Princip funkce reproduktoru je následující: Kmitací cívka je navinuta na cívkové těleso spojené s membránou a umísťuje se do vzduchové mezery mezi pólové nástavce permanentního magnetu. Ten vytváří ve vzduchové mezeře stacionární magnetické pole interagující s magnetickým polem cívky, které je způsobeno průchodem signálového proudu. Vzniká magnetická síla, která uvádí spolu s cívkou do pohybu také cívkové těleso a membránu. Její chvění rozkmitává částice vzduchového prostředí a vzniká zvukové vlnění.

Elektrodynamické reproduktory se konstruují buď jako přímovyzářující, kde kmitající membrána bezprostředně doléhá na venkovní vzduchové prostředí, nebo nepřímovyzářující, obsahující zvukovod pro zvýšení účinnosti či změnu směrovosti reproduktoru.

Prvním elektrickým parametrem ve výčtu je **jmenovitá impedance** Z_{nom} , tj. minimální absolutní impedance, které reproduktor nabývá ve svém frekvenčním spektru od rezonanční frekvence výše. Nejobvyklejší hodnoty jsou 4 a 8 Ω (dále v menším zastoupení 2, 6, 16 Ω)⁵.

⁴Dále reproduktory elektromagnetické, elektrostatické, piezoelektrické atd.

⁵Skutečná velikost impedance by neměla klesnout pod 80 % udávané jmenovité hodnoty [1].

Je důležité si uvědomit, že impedance reproduktoru Z je frekvenčně závislou veličinou a zpravidla platí, že se zvyšující se frekvencí reprodukováného signálu roste rovněž impedance reproduktoru.

Nejen impedanční přizpůsobení na vstupu a výstupu zesilovače, nýbrž i příznivý vztah mezi **výkonovou zatížitelností** P reproduktoru a výstupním výkonem zesilovače P_{out} stěžejně ovlivňuje technické možnosti kytarového komba⁶. V limitních případech, tj. při maximálním vybuzení, platí následující možnosti:

1. Hrozí mechanické či elektrické poškození až zničení reproduktoru vlivem příliš zesíleného signálu, pokud $P \ll P_{out}$
2. Dojde k optimálnímu výkonovému přizpůsobení, jestliže $P \cong P_{out}$
3. Přetěžovaný zesilovač se může dostat do limitace, zkreslený signál může způsobit nepří-
měřené a nepříznivé kmitání cívky reproduktoru, jestliže $P \gg P_{out}$

Vzhledem k faktu, že reproduktor naprostou většinu elektrické energie přemění na teplo, jsou jeho výkonové možnosti v širším časovém měřítku omezeny právě schopnostmi zvýšené teplotě odolat a tepelnou energii odvádět. Maximální špičkový výkon je limitován spíše mechanickými vlastnostmi reprodukčního zařízení, především pevností materiálu a výchylkou kmitací částí.

Charakteristická citlivost SPL (Sound Pressure Level) se uvádí pro bod umístěný na ose reproduktoru, ve vzdálenosti 1 m a při příkonu 1 VA a definuje se jako logaritmicky vzatý poměr mezi průměrnou velikostí efektivního akustického tlaku (pro udaný rozsah frekvencí) a referenční hodnoty $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa [1]. Maximální hladina akustického tlaku SPL_{max} ve vzdálenosti 1 m se pak vypočítá jako součet charakteristické citlivosti a maximálního výkonového zatížení zesilovače⁷.

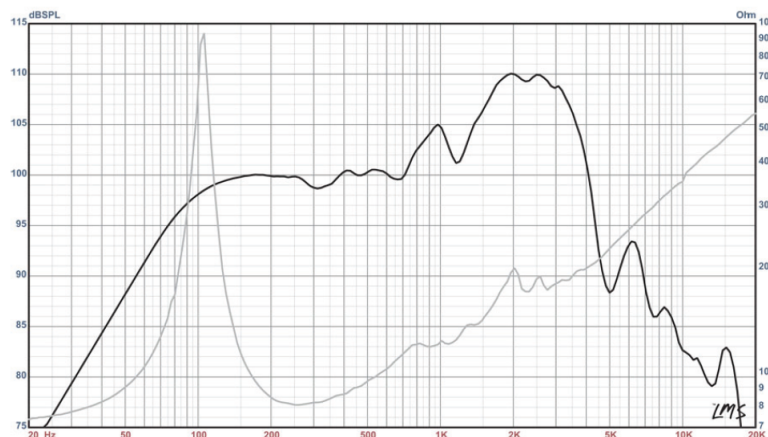
$$SPL = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad [dB] \quad (1.4)$$

$$SPL_{max} = SPL + 10 \cdot \log (P_{max}) \quad [dB] \quad (1.5)$$

⁶Jedná se o výkony RMS, ne o výkony hudební (špičkové).

⁷Hladina akustického tlaku se zpravidla měří v ose reproduktoru při konstantním napětí signálu. V případě měření směrové charakteristiky je úhel sevřen osou reproduktoru a jeho spojnicí s měřicím zařízením.

Frekvenční a směrové charakteristiky (viz obrázek 1.3) ukazují nelineární závislosti hladiny akustického tlaku SPL (často také impedance) na frekvenci a úhlu. Důležitá je tzv. rezonanční frekvence f_r mající takovou nejmenší hodnotu, při níž je impedance reproduktoru největší, a je chápána jako začátek pásma reprodukovatelných frekvencí. Udává se pro umístění ve volném prostoru a snižuje se vkládáním reproduktoru do ozvučnice [1].



Obrázek 1.3: Frekvenční charakteristika reproduktoru Legend 1518 [15]

1.5 Ozvučnice

V případě kytarového komba skýtá skříň ozvučnice komplexnější využití. Nejenže slouží jako rám pro uložení reproduktoru, který zároveň plní akustickou funkci, ale zároveň v sobě ukládá elektrické zařízení, potřebné k reprodukci zvuku. Z toho důvodu se zařízení nazývá kombo zesilovač⁸.

Kytarové ozvučnice se zpravidla konstruují buď jako klasické **uzavřené boxy** nebo jako **skříň otevřená** (tj. s chybějící zadní stranou). Nelze stanovit obecně, který z obou základních konstrukčních řešení je vhodnější, protože zásadním a rozdílným způsobem mění vlastnosti výsledného zvuku, a proto záleží pouze na subjektivních pocitech a přáních hudebníka.

Reproduktor instalovaný do uzavřené skříně vyzařuje většinu akustické energie před sebe. Zadní plocha membrány je využita minimálně. Z tohoto důvodu vnímá hráč stojící za kom-

⁸Podle *The American Heritage Dictionary of the English Language* se slovem kombo označuje: 1. Malá jazzová (hudební) skupina; 2. Produkt nebo výsledek kombinování, kombinace (překlad).

bem utlumený a nevýrazný zvuk, který během případné veřejné produkce může způsobovat problémy. Naproti tomu otevřená ozvučnice plně využívá i zadní plochy reproduktoru a ten vyzařuje s menší směrovostí i do zadního prostoru [6].

Absence zadní strany skříně způsobuje zvýraznění vyšších frekvencí a současně utlumení bassů, minimální měrou ovlivní frekvenční charakteristiku reproduktoru a zvuk získává bohatší a širší barvu (bohužel také ztrácí plnost). Naproti tomu uzavřené ozvučnice poskytují plnější bassy a pouze mírně zvýrazněné výšky [6].

Se zvukem a dále přenosností komba, která nabývá v rámci zaměření této bakalářské práce stěžejní úlohu, souvisí i **objem** ozvučnice. Obecně platí, že větší **rozměry** skříně (a z nich vyplývající **hmotnost**) poskytují výraznější bassy⁹. Na druhé straně začínající hudebník musí být schopen sám a bez větších problémů kombo přenášet a to již předznamenává limitovaný objem a hmotnost zařízení¹⁰. Příliš objemné skříně navíc zvýrazňují nízké tóny natolik, že se bassy rozostřují, slévají a duní.

I když dnes existuje velká rozmanitost tvarů ozvučnic, standardně nejpoužívanější je tvar kvádry, který využívá pouze pravých úhlů, nikoliv zkosených stěn, a jeho rozměry by měly odpovídat povaze uloženého zařízení (k porovnání viz obrázky 1.4 a 1.5 - různá měřítka).



Obrázek 1.4: FrontmanTM 65R [16]



Obrázek 1.5: Kustom[®] KG1 [17]

⁹Z důvodu delších vlnových délek bassových signálů [6].

¹⁰Ze zkušenosti vychází maximální hmotnost 15 kg.

1.6 Technické parametry

První kapitolu uzavírá výčet jmenovitých technických parametrů konstruovaného zařízení. V rámci bakalářské práce jsou tyto hodnoty chápány jako ideální či referenční. Skutečné parametry zařízení budou vždy porovnávány s nimi (viz kapitola 4).

- Napájecí napětí U_{CC} : $\sim 230\text{V}/50\text{ Hz}$
- Pracovní napětí U_N : $\pm 15\text{ V}$
- Příkon P_{in} : 236 VA
- Výstupní výkon P_{out} : $100\text{ W}/4\ \Omega$
- Vstupní citlivost předzesilovače S_{in} : 400 mV (vyšší citlivost), 2 V (nižší citlivost)
- Vstupní citlivost výkonového zesilovače S_P : 500 mV pro $100\text{ W}/4\Omega$
- Korekce: $\pm 15\text{ dB}/100\text{ Hz}$ (hloubky), $\pm 15\text{ dB}/800\text{ Hz}$ (středů), $\pm 15\text{ dB}/6000\text{ Hz}$ (výšky)
- Rozměry: $440 \times 440 \times 250\text{ mm}$
- Hmotnost: 15 kg

Kapitola 2

Realizace elektrických obvodů

Následující text podává souhrnný přehled informací, potřebných k pochopení činnosti elektrických obvodů kytarového komba. Je přehledně rozdělen podle funkčních bloků a vedle popisu zapojení, která budou přítomna v konstruovaném zařízení, zmiňuje také další způsoby realizace. Jejich přednosti i nedostatky jsou vždy uvedeny.

2.1 Předzesilovač

Obvod předzesilovače plní v kytarovém kombu více funkcí. Vedle samotného zesílení napětového signálu generovaného hudebním nástrojem zajišťuje zkreslující kanál také jeho tvarování.

2.1.1 Přepínání vstupní citlivosti a impedanční přizpůsobení

Vzhledem ke skutečnosti, že obvody elektrofonických kytar¹ obsahují vedle strunových snímačů a tónových clon také vlastní předzesilovač často spojený s aktivními korekcemi, musí předzesilovač být schopen přijímat signály různých intenzit tak, aby byl zachován výstupní výkon P_{out} . Zároveň je důležité impedančně přizpůsobit výstup kytary a vstup komba.

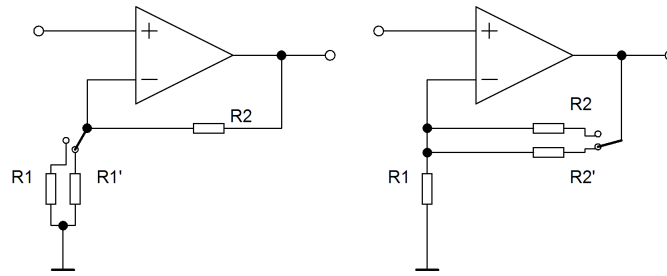
V případě přímého propojení nástroje s předzesilovačem, realizovaným pouhými tranzistory, by kvůli nízké vstupní impedanci předzesilovače Z_{in} docházelo k velkému proudovému zatěžování. Důsledkem toho by na vnitřním odporu nástroje R_s vznikal velký úbytek napětí a výstupní signál by se utlumil².

¹Elektrofonické kytary se v závislosti na přítomnosti součástek vyžadujících stejnosměrné napájení rozdělují na **aktivní** a **pasivní**.

²Podobná situace nastává u zkratovaného zdroje napětí.

V praxi signál ztrácí zejména vyšší frekvence, protože vnitřní odpor se navyšuje o frekvenčně závislou induktivní reaktanci cívek snímačů X_{Ls} . Proto se na vstupu předzesilovače umísťuje operační zesilovač s vysokou vstupní impedancí Z_{in} .

Změny vstupní citlivosti S_{in} lze dosáhnout několika způsoby. Použití přepínače přímo v záporné zpětné vazbě neinvertujícího zapojení OZ se nedoporučuje kvůli skokové změně zesílení v mezipoloze přepínače (viz obrázek 2.1). V případě přepnutí mezi rezistory zpětnovazebního děliče spojenými se zemí (R_1 a R'_1) OZ krátkodobě přestává zesilovat ($A_N = 1$).



Obrázek 2.1: Nevhodná zapojení přepínačů vstupní citlivosti do záporné zpětné vazby

Během přepínání rezistorů spojených s výstupem OZ (R_2 a R'_2) dochází k chvilkovému prudkému navýšení hodnoty zesílení, odpovídající vztahu 2.1³ [2]. Reálné operační zesilovače jsou samozřejmě limitovány hodnotou saturačního napětí U_{sat} , které např. u zesilovače NE5532 AP při standardním symetrickém napájení $U_{CC} = \pm 15$ V dosahuje asi ± 13 V [11].

Takové napětí může vedle dílčích součástek poškodit i celý výkonový zesilovač a k němu připojený reproduktor!

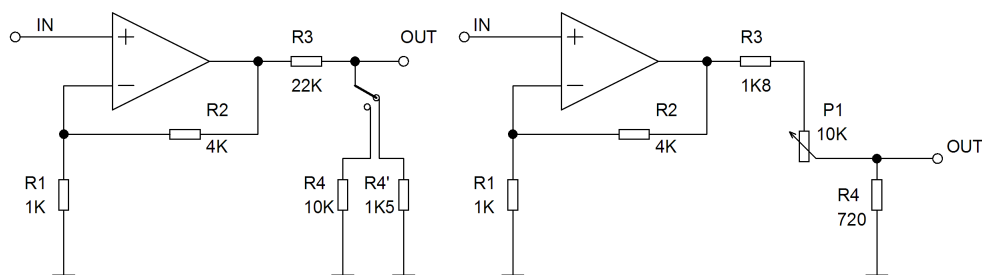
$$A_N = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) / \left(1 + \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{A_U}\right) \quad (2.1)$$

Vhodnější možností je zapojení OZ s konstantním zesílením v sérii se sdruženým děličem napětí, kterým se nastaví požadovaná S_{in} jen řešením následující soustavy tří rovnic s neznámými R_3 , R_4 a R'_4 pro konkrétní hodnoty vstupní citlivosti výkonového zesilovače S_P a vyšší a nižší vstupní citlivosti předzesilovače S_{inH} a S_{inL} (obrázek 2.2, hodnoty pro $S_P = 500$ mV).

$$\frac{S_{inH}}{S_{inL}} = \frac{R'_4}{R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3 + R'_4}\right) \quad (2.2)$$

$$S_P = A_N S_{inH} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = A_N S_{inL} \cdot \frac{R'_4}{R_3 + R'_4} \quad [V] \quad (2.3)$$

³U ideálního OZ je $A_U = \infty$, tudíž druhý člen je roven 0.



Obrázek 2.2: Zapojení přepínače vstupní citlivosti s děličem napětí nebo potenciometrem

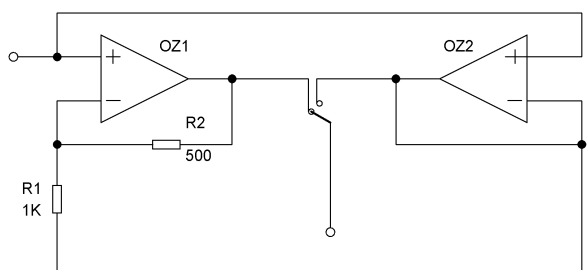
Pro účely jemného doladění lze využít podobného zapojení, kdy se do děliče vkládá potenciometr P_1 v reostatovém zapojení. Nevýhodami tohoto řešení je vyšší cena kvalitnějšího potenciometru v porovnání s cenou přepínače i jistá nadbytečnost složitějšího ovládání pro začínajícího hudebníka.

Následuje vztah 2.4 pro výpočet velikosti odporu potenciometru. Hodnoty rezistorů R_3 , R_4 musí odpovídat vztahu 2.3.

$$P_1 = \frac{S_{inL} - S_{inH}}{S_{inH}} \cdot (R_3 + R_4) \quad [\Omega] \quad (2.4)$$

Za třetí lze využít paralelního neinvertujícího zapojení dvou operačních zesilovačů s různými A_N . Na obrázku 2.3 první OZ dosahuje zesílení 1,5 a představuje vstup s vyšší citlivostí. Druhý OZ zapojený jako sledovač napětí vyjma impedančního přizpůsobení procházející signál neovlivňuje.

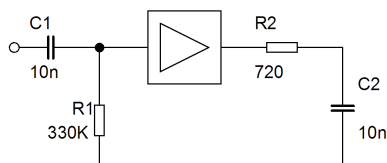
Obvod v sobě kombinuje principy předchozích způsobů realizace, jelikož přepínatelné zesílení mění vstupní citlivost bez nebezpečí nestability obvodu. Nespornou nevýhodou je dodatečné umístění děliče za sledovač z důvodu zeslabení signálu na úroveň S_P a dále neekonomické použití dvou OZ a potřeba větší plochy DPS.



Obrázek 2.3: Zapojení přepínače vstupní citlivosti s dvěma OZ

2.1.2 Filtrace nežádoucích signálů

V souvislosti s impedančním přizpůsobením a odstraněním nadbytečného šumu na vstupu předzesilovače je výhodné opatřit jej svodovým rezistorem, který plní funkci šumového filtru (viz obrázek 2.4). S předřazeným filtračním kondenzátorem, který odstraňuje stejnosměrnou složku signálu (tzv. offset), navíc tvoří horní propust.



Obrázek 2.4: Pasivní HP a DP 1. řádu na vstupu a výstupu předzesilovače

HP nastavená na frekvenci 50 Hz přispěje k odstranění indukovaných nízkofrekvenčních napětí, aniž by utrpěl užitečný signál, neboť základní frekvence struny E je přibližně 82,4 Hz. Ladění propustí vyjadřuje následující vztah [3].

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad [Hz] \quad (2.5)$$

Vzhledem k velké vstupní impedanci OZ je potřeba volit vhodnou hodnotu rezistoru, tak aby zkratoval pouze šum. Hodnoty odporu v řádu jednotek k Ω a menších způsobí rovněž zkrat užitečného signálu, odpor v řádu M Ω naopak odpovídá rozpojení. Optimální hodnota je asi 330K. Velikost kapacity 10n je dopočítána na základě vztahu 2.5.

Indukované vysokofrekvenční napětí nemá na akustický signál přímý vliv, jelikož kytarový reproduktor věrně přenáší frekvence v řádu jednotek kHz. Přesto z důvodu zbytečného zvýšení výkonového zatížení se doporučuje umístit v signálové cestě zároveň dolní propust, která zúží pásmo zesilovaných frekvencí shora.

Audio zesilovače musí poskytovat nezkreslené zesílení v celém akustickém pásmu⁴, a proto se mezní frekvence DP nastavuje nad 20 kHz. V případě reproduktoru kytarového komba se frekvence volí menší a dolní propust z obrázku 2.4 nastavená na přibližně 19,4 kHz dostatečně filtruje vysokofrekvenční napětí bez újmy užitečného signálu.

⁴Tj. pro frekvence 60 Hz – 20 kHz.

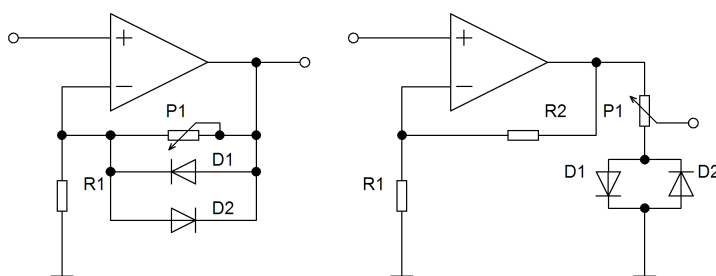
2.1.3 Zkreslující kanál

První kanál zesilovače signály netvaruje, jeho frekvenční charakteristika je ideálně konstantní v celém spektru reprodukovatelných frekvencí, a proto se označuje jako čistý kanál. Kvůli věrohodnému přenosu, tedy s nízkým harmonickým a intermodulačním zkreslením⁵, ho začínající hudebník využije právě nejvíce.

Z hlediska elektrického zapojení nemusí signálová cesta vyjma přepínače citlivosti a ovládání hlasitosti obsahovat žádné další funkční prvky. Ovladač hlasitosti se realizuje jednoduše jako proměnný dělič napětí a výstup se sjednocuje s jezdcem potenciometru. Je nutné si uvědomit, že potenciometr se umísťuje paralelně k rezistoru R_4 (případně R'_4) a jeho odpor by proto měl být v poměru k odporu rezistoru co možná největší.

Zkreslující kanál se využívá k tvarování a stylizaci signálu a jeho součástí mohou být i kytarové efekty⁶. Existují rovněž externí efektové krabičky, které se zapojují po jedné i ve skupinách do série mezi nástroj a kombo a díky nim získává nastavení výsledného zvuku velkou variabilitu.

Nejjednodušší možností jako tvarovat signál je zapojení antiparalelní kombinace diod buď do zpětné vazby OZ nebo na výstup proti zemi (viz obrázek 2.5). V prvním zapojení diody způsobují symetrické ořezání signálů s amplitudou nad maximální propustné napětí (tzv. clipping). V druhém případě se dosáhne intenzivnějšího efektu kombinace diod a potenciometru.

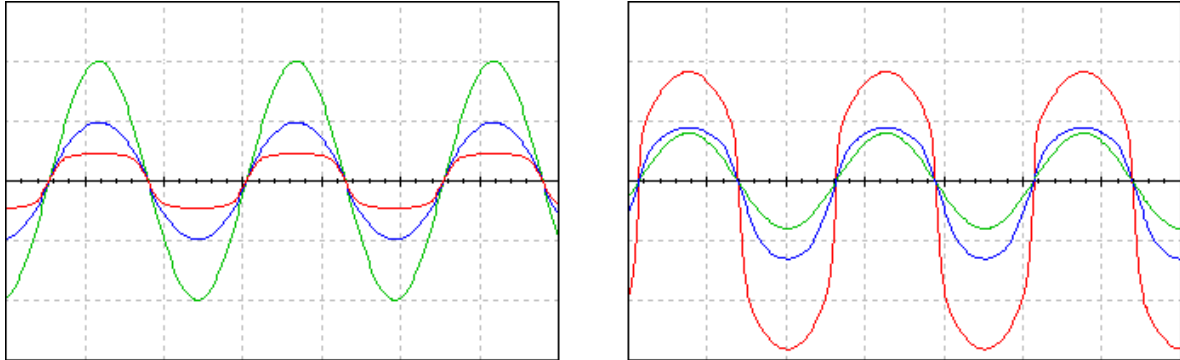


Obrázek 2.5: Antiparalelní zapojení diod pro tvarování signálu ve zpětné vazbě a výstupu OZ

⁵Intermodulační zkreslení vzniká při současném přivedení více harmonických signálů na vstup zesilovače, kdy vedle původního zesíleného signálu a jeho vyšších harmonických složek (harmonické zkreslení) vznikají i složky součtové a rozdílové [1].

⁶Nejznámějšími efekty jsou např. Delay (zpoždění), Hall (ozvěna) a Chorus (syntéza více tónů podobné barvy a takřka stejné základní frekvence). Osobitost až unikátnost zvukové podoby zkreslení je vyžadována profesionálními hudebníky a výrobci jejím prostřednictvím nabývají konkurenčních výhod.

V této úrovni se dá široce experimentovat, jelikož výsledný zvuk pozměňuje nesymetrické zapojení diod, tj. různý počet v propustném a závěrném směru (viz obrázek 2.6). Typ použitých diod (křemíkové, germaniové, Zenerovy i LED) a velikost předzesílení signálu (tzv. boost) také ovlivňuje. Vyjma operačních zesilovačů se využívají tranzistory (bipolární i unipolární) a to nejen pro boost, ale i zkreslení. Obvody drahých modelů mohou obsahovat elektronky [7].



Obrázek 2.6: Simulace průběhů zkreslených signálů v závislosti na zapojení diod (1N4148). Vlevo na výstupu proti zemi a vpravo ve zpětné vazbě OZ s nesymetrickým zapojením diod (zelená nejmenší až červená největší míra zkreslení)

Složitějším zapojením zkreslujícího kanálu je obvod krabicového kytarového efektu Big Muff od firmy Electro-Harmonix z konce 60. let dvacátého století.

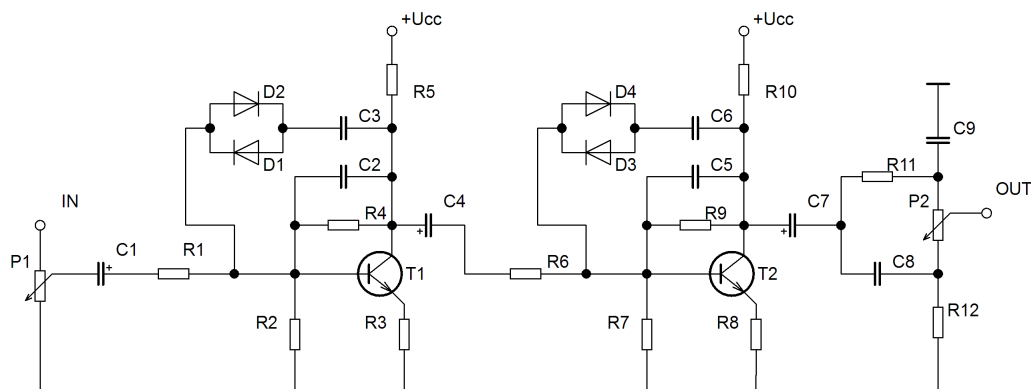
Původní obvod obsahuje čtyřstupňové zapojení NPN tranzistorového zesilovače se společným emitorem (částečně na obrázku 2.7). První stupeň je zakončen potenciometrem P_1 , jímž se nastavuje požadovaný boost a tím i míra zkreslení. Následující dva signál tvarují.

Elektrolytické kondenzátory C_1 , C_4 a C_7 odstraňují stejnosměrnou složku signálu a keramické kondenzátory C_3 a C_6 navíc signál zpětnovazebně tvarují spolu s diodami D_1 až D_4 .

Dvojice odporů R_2 , R_4 a R_7 , R_9 spolu s kondenzátory C_2 a C_5 tvoří frekvenčně závislý vstupní dělič, který zajišťuje pracovní bod tranzistorů T_1 a T_2 (signál limitující z obou stran).

R_3 a R_8 zprostředkují zápornou proudovou zpětnou vazbu a zapojení děličů zápornou napětovou zpětnou vazbu. R_5 a R_{10} jsou kolektorové rezistory, snižující napájecí napětí na příslušnou úroveň.

Čtvrtému stupni je předřazen tónový korektor, tvořený paralelním zapojením DP a HP. Regulace nízkých a vysokých frekvencí se provádí pomocí společného potenciometru P_2 . Opětovné zesílení signálu prošlého korektorem zastává poslední stupeň s ovládáním hlasitosti.



Obrázek 2.7: Obvod tvarovacích stupňů s tónovým korektorem efektu Big Muff [7]

Korekční obvod je možné modifikovat přidáním antiparalelního zapojení diod vůči zemi, které dodatečně zkresluje v rámci basů, výšek nebo obojího. Výsledný zvuk je opět závislý na více parametrech zapojení diod. Korektor lze rozšířit o další pásma prostým paralelním přidáním dalších propustí.

2.1.4 Indikace provozních stavů

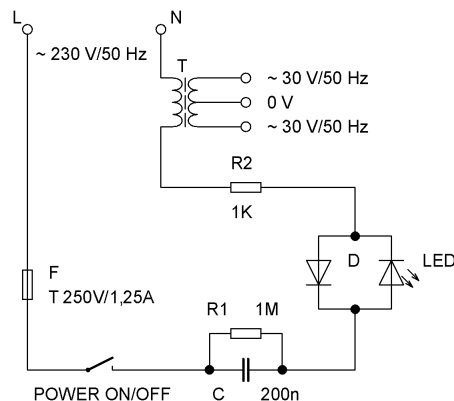
Nejvýhodnější je signalizace pomocí LED diod, protože dokáží emitovat světlo v širokém spektru, vyrábí se v rozmanitých velikostech, s různými svítivostmi a vyzařovacími úhly a také odběrem.

Svítivou diodu indikující zapnutý stav nebo napájení je rozumné odlišit velikostí a barvou od méně důležitých kontrolky přepínačů a umístit ji na specifické místo čelního panelu, zpravidla k vypínači. Ostatní signalizační prvky mohou být rozmístěné volněji, ale vždy tak, aby podávaly zjevnou informaci o stavu komba.

Zapojení indikace zapnutí je možné realizovat více způsoby. Např. přímým zapojením obvodu LED diody do série za hlavní vypínač a sériově či paralelně⁷ vůči primárnímu vinutí transformátoru (viz obrázek 2.8, více v [8]). Lze také využít zapojení doutnavky.

Při práci s obvody napájenými fázovým napětím je **důležité dodržovat pravidla** své i cizí **bezpečnosti!**

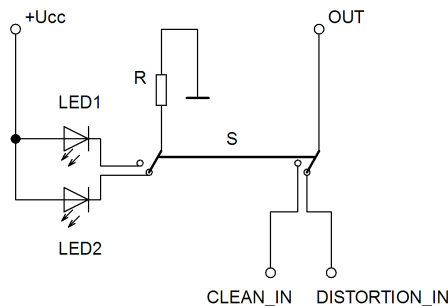
⁷V tomto případě není potřeba kondenzátor přemostit vybíjecím rezistorem.



Obrázek 2.8: Zapojení obvodu LED diody do napájecí cesty primárního vinutí podle [8]

Další možností je zapojení indikace na napětí sekundárního vinutí, nejlépe stejnosměrné po průchodu obvodem usměrňovače⁸. Vývody LED diody je přípustné zapojit na napájení desky předzesilovače nebo ekvalizéru.

Signalizace aktivního kanálu je realizována jednoduchým obvodem podle obrázku 2.9 s použitím dvoupólového přepínače. Kontrolkám se srovnatelným odběrem se přiřazuje společný rezistor umístěný za výstupem přepínače. V opačném případě je nutné zapojit rezistor do obou vstupních větví.



Obrázek 2.9: Realizace současného přepínání kanálů a indikace

⁸Usměrňovač není nutné realizovat zvlášť, protože ho obsahují kvalitnější výkonové zesilovače.

2.2 Ekvalizér

Pásmový korektor neboli ekvalizér se zapojuje za předzesilovač, aby nedocházelo k zesilování vlastního šumu korektoru⁹. Ovládání je potenciometrické, rozdělené do více frekvenčních pásem a zpravidla s posunutou nulou z důvodu kladné i záporné korekce.

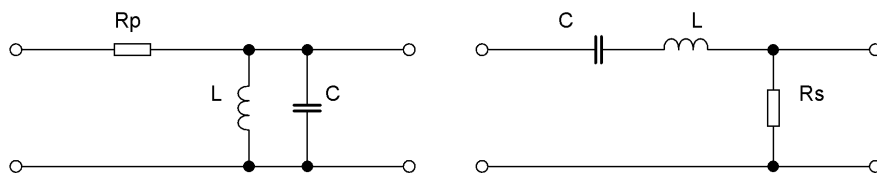
Počet frekvenčních pásem je u kytarových komb ve většině případů nižší v porovnání s hi-fi zařízeními, protože akustické spektrum je užší. Rozeznávají se korekce nízkých, středních a vysokých frekvencí. Korektory středů mohou být i parametrické, tj. jejich mezní (rezonanční) frekvence a šířka pásma je nastavitelná.

2.2.1 Pásmové propusti

Pásmové propusti jsou hlavními funkčními bloky ekvalizéru a jejich realizace závisí na konkrétní aplikaci. Rozhodující je řád filtru, tj. nejvyšší mocnina polynomu ve jmenovateli racionální lomené přenosové funkce, od něhož se vyvozuje strmost a tvar modulové charakteristiky, velikost činitele jakosti Q ¹⁰ a omezení v použití pasivních a aktivních součástek [3].

Obecně platí, že čím vyšší řád filtru, tím větší počet součástek, vyšší cena, strmější filtrace a vyšší činitel jakosti.

Pásmové propusti jsou nejméně 2. řádu¹¹ a v jejich zapojení musí být přítomny minimálně dva akumulací prvky, což předznamenává použití cívek [3] (viz obrázek 2.10, vztahy pro návrh 2.6 a 2.7). Jejich magnetické pole je však nežádoucí kvůli ovlivňování ostatních součástek na desce a pro akustiku se proto spíše hodí aktivní součástky, hlavně OZ.



Obrázek 2.10: Schéma PP RLC 2. řádu

⁹V případě opačného pořadí zapojení a aktivního zkreslujícího kanálu šum přehlušuje užitečný signál.

¹⁰V souvislosti s filtry se **činitel jakosti** Q definuje jako podíl mezi rezonanční frekvencí a rozdílem frekvencí, při nichž charakteristika poklesne o 3 dB (šířka pásma B), tj. $Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = \frac{f_r}{B}$.

¹¹Obecné obvody 2. řádu se nazývají **biquady**.

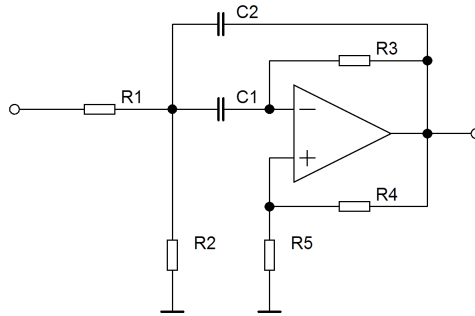
$$Q = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot R_P = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R_S} \quad (2.6)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz] \quad (2.7)$$

Vhodnější zapojení pásmové propusti je na obrázku 2.11, kde se místo cívky využívá operačního zesilovače. Obvod vychází z obecné struktury ARC biquadu s trojbranem. Následují návrhová pravidla podle [3]:

- Shodné kondenzátory C_1 a C_2 .
- Hodnoty kondenzátorů $C_1 = C_2 = C = \frac{3 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{f_r}} F$.
- Poměr $\alpha_{min} = \frac{R_3}{R_1^*} = 4Q^2$ pro $Q < 15$.
- Hodnoty $R_1^* = \frac{R}{\sqrt{f_r}}$, $R_3 = R\sqrt{f_r}$, kde $R = \frac{1}{2\pi f_r C}$.
- Poměr $\gamma = \frac{R_4}{R_5}$, $R_4 = R\sqrt{\gamma}$, $R_5 = R/\sqrt{\gamma}$, kde $R = 3 \cdot 10^3 \Omega$.
- Snížení přenosu $K(f_r)$ na $K_{PP} = 1$, $R_1 = \frac{R_1^* K(f_r)}{K_{PP}}$, $R_2 = \frac{R_1^* R_1}{R_1^* - R_1}$.

Na základně těchto pravidel a praktických zkušeností byly určeny hodnoty součástek umístěné do tabulky 2.1. Některé hodnoty odporů rezistorů nejsou jmenovité a musí se vytvořit sériovým zapojením dvou součástek.



Obrázek 2.11: Schéma PP ARC 2. řádu s 1 OZ podle Huelsmana

Součástka	Bassy	Středy	Výšky
R_1	3K2	4K	5K3
R_2	3K2	4K	5K3
R_3	1K6	2K	2K7
R_4	1K	1K	1K
R_5	1K	1K	1K
C_1	1u	100n	10n
C_2	1u	100n	10n

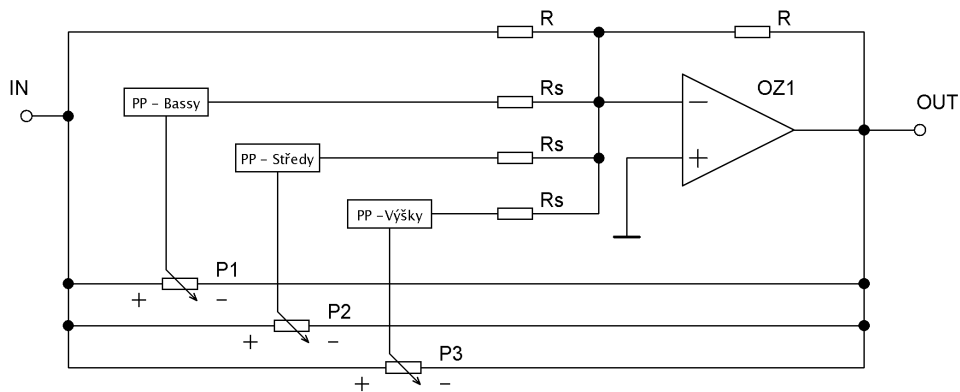
Tabulka 2.1: Tabulka hodnot součástek PP pro $f_r = 100, 800, 6000$ Hz a $Q = 1$

2.2.2 Korekční obvody

Obvody korektorů využívají zapojení sčítacích zesilovačů s OZ, a PP je proto nutné opatřit invertory¹². Další podmínkou je zesílení propustí $K_{PP} = 1$. Zapojení podle Huelsmana z obrázku 2.11 využívá ke snížení přenosu děliče s rezistory R_1 a R_2 .

Zapojení ekvalizéru s 1 OZ z obrázku 2.12 pracuje na principu sčítání frekvenčně nezávislých (větev s rezistorem R) a závislých signálů na záporném vstupu operačního zesilovače. Velikost proudů prošlých PP odpovídá vytočení potenciometrů P_1 až P_3 .

Nevýhodou zapojení je sumace šumu na vstupu OZ [3], a proto je lepší použít obvod korektoru s dvěma invertujícími OZ (viz obrázek 2.13), které při shodném vytočení potenciometrů odečtou shodný šum.



Obrázek 2.12: Principiální schéma ekvalizéru s 1 OZ

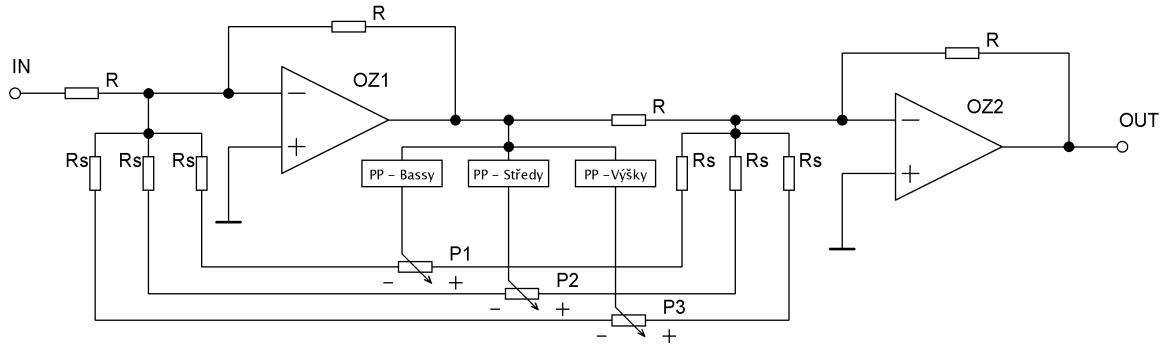
¹²Invertor je invertující zapojení operačního zesilovače s $A_I = 1$.

Minimální a maximální přenos korektoru $K_{U_{min}}$ a $K_{U_{max}}$ se vypočítá podle následujících vztahů pomocí vodivostí G a G_S a přenosu pásmových propustí K_{PP} [3]:

$$K_{U_{min}} = \frac{G}{G + G_S \cdot K_{PP}} \quad (2.8)$$

$$K_{U_{max}} = \frac{G + G_S \cdot K_{PP}}{G} \quad (2.9)$$

Existují další způsoby zapojení ekvalizéru. Např. zapojení s neinvertujícím zesilovačem a sériovými rezonančními obvody nebo známý Baxandallův obvod, jakožto sdružený korektor bassů a výšek (obě zapojení s komentářem v [3]). Vedle obvodů s diskrétními součástky je možné použít i integrovaný dvou pásmový ekvalizér TDA1524 [12].



Obrázek 2.13: Principiální schéma ekvalizéru s 2 OZ

2.3 Výkonový zesilovač

Rozkmit signálu přivedeného z hudebního nástroje, předzesíleného na pracovní úroveň a upraveného ekvalizérem nebo zkreslujícím kanálem je řádově stovky mV až jednotky V. Aby reproduktor převedl napěťový signál na akustické vlnění s příslušnou intenzitou, tj. aby byl reprodukován zvuk dostatečně hlasitý, je potřeba signál výkonově přizpůsobit.

Koncový (též výkonový) zesilovač, jehož účel je právě dodat signálu příslušný výkon, se zapojuje do signálové cesty až jako předposlední, těsně před reproduktor. Výstupní napětí, které je schopen vytvořit na svorkách, je limitováno velikostí střídavého napájecího napětí sekundárního vinutí napájecího toroidního transformátoru. Potřebný výstupní výkon P_{out} se realizuje obvody s vhodně dimenzovanými součástkami, předně výkonovými bipolárními tranzistory.

Taková zapojení mají většinou nižší účinnost, která nutí využívat masivnějších pasivních chladičů a v případě PA (Public address) ozvučovací techniky i aktivního chlazení. Výkonový zesilovač je proto vhodné umístit na šasi co nejblíže k zadní straně ozvučnice pro připojení k pasivnímu chladiči, přičemž profil chladiče může nahrazovat podstatnou část zadní stěny šasi. K uspokojivému odvodu tepla se používá teplovodivá pasta.

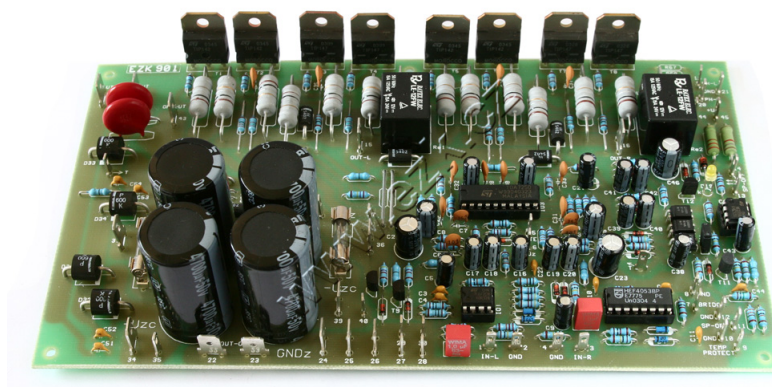
Při konstrukci komba se využije stavebnice koncového zesilovače, protože realizace vlastního zapojení, splňujícího požadavky na výkon, je příliš složitá a tudíž nad rámec této bakalářské práce. Stavebnicová zapojení navíc poskytují výhodné doplňující funkce prostřednictvím vedlejších obvodů na desce a jejich cena je v porovnání s odhadovanými finančními prostředky vynaloženými při stavbě vlastního zesilovače nízká.

Volba proběhla mezi dvěma stavebnicemi různých výrobců (technické údaje v tabulce 2.2):

- **KSX9901** (EZK - elektronika Zdeněk Krčmář)
- **SPV 100P215+** (ALDAX – Electronics by Sinclair&Pierre)

Zesilovač	KSX9901	SPV 100P215+
Napájecí napětí	2x ~ 20 - 29 V/50 Hz	2x ~ 20 - 30 V/50 Hz
Počet audio kanálů	Stereo/mono	Mono
Zatěžovací impedance	Minimálně 4 Ω (stereo), 8 Ω (mono)	Minimálně 4 Ω
Výstupní výkon	2x 140 W/4 Ω (stereo), 240 W/8 Ω (mono)	100 W/4 Ω
Vstupní citlivost	800 mV	500 mV (max.)
Vstupní impedance	22 k Ω	10 k Ω (f = 1 kHz)
THD	0,01 %	0,1 % (f = 1 kHz, P = 90 W/4 Ω)
SNR_dB	100 dB	100 dB
Rychlost přeběhu	15 V/ μ s	18 V/ μ s
Rozměry (D x Š mm)	220 x 125 mm	195 x 90 mm

Tabulka 2.2: Tabulka parametrů stavebnic výkonového zesilovače [9] a [10]



Obrázek 2.14: Deska výkonového zesilovače KSX9901 [10]

Zesilovače jsou napájeny přibližně stejným symetrickým napětím, vyžadujícím symetricky vyvedené sekundární vinutí transformátoru. KSX9901 standardně zesiluje stereo kanál. Zesílení samotného mono kanálu lze provést přepnutím do můstkového zapojení, čímž se zvýší i výstupní výkon.

Ten je v porovnání se jmenovitým výstupním výkonem SPV 100P215+ mnohem vyšší, a proto se zesilovač firmy EZK hodí spíše pro kombo zesilovač na malé pódium, kde ve spojení s citlivým reproduktorem (SPL nad 90 dB) nevyžaduje žádné další zesílení¹³. SPV 100P215+ naproti tomu nalezne využití spíše v domácích podmínkách.

Minimální zatěžovací impedance (Z_{nom} reproduktoru) je v obou případech 4 Ω , jen při využití můstkového zapojení musí být 8 Ω . Většina kytarových reproduktorů má $Z_{nom} = 8 \Omega$ nebo více a aktuální hodnoty výstupních výkonů díky tomu budou nižší. KSX9901 má vyšší S_P a odpory rezistorů R_3 , R_4 a R'_4 je proto vhodné upravit podle vzorců 2.2 a 2.3.

Celkové harmonické zkreslení je u zesilovače firmy EZK desetkrát nižší, ale z tabulkových údajů nelze přesně zjistit, za jakých podmínek byla hodnota změřena, a tak přímé srovnání mezi oběma stavebnicemi není možné. Přeběhová rychlost (Slew Rate SR) je u SPV 100P215+ naopak vyšší. Rozdíly v rozměrech desek nejsou výrazné a liší se o 25 mm (délka) a 35 mm (šířka).

¹³Výhodné je využít možnosti zesilovat stereo signál a realizovat kombo zesilovač jako tzv. **kytarový full-stack**, což je funkční spojení kytarového zesilovače (hlavy) s dvěma reproboxy. Tzv. **half-stack** obsahuje jen jeden reproduktor. Terminologicky je kytarový kombo zesilovač half-stack integrovaný do jedné skříně.



Obrázek 2.15: Deska výkonového zesilovače SPV 100P215+

Oba zesilovače využívají vhodného napájecího obvodu a vedlejších obvodů pro zpožděné připojení a ochranu reproduktorů. KSX9901 navíc obsahuje funkci MUTE (umlčení výstupního signálu -40 dB) a manuální odpojování zátěže. SPV 100P215+ pro změnu stabilizovaný pomocný zdroj symetrického stejnosměrného napětí ± 15 V, jímž lze napájet desku předzesilovače a ekvalizéru.

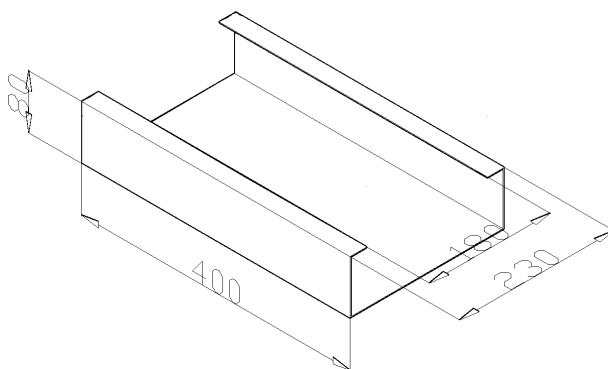
Kapitola 3

Realizace mechanických částí

Předposlední kapitola stručně popisuje stavbu neelektrických částí komba a probírá uložení elektrických obvodů. Zaměřuje se především na nejznámější a konstrukčně nejjednodušší způsob realizace.

3.1 Šasi

Umístění desek plošných spojů a toroidního transformátoru je v kombu řešeno pomocí šasi¹, vyrobeného z nerezového plechu tloušťky cca 2 mm. V zásadě je možné využít jen prosté kovové desky dostatečné plochy, která se připevní zevnitř na bočnice nebo na horizontální přepážku (nutné zvýšení hmotnosti).



Obrázek 3.1: Nákres šasi bez bočních stěn

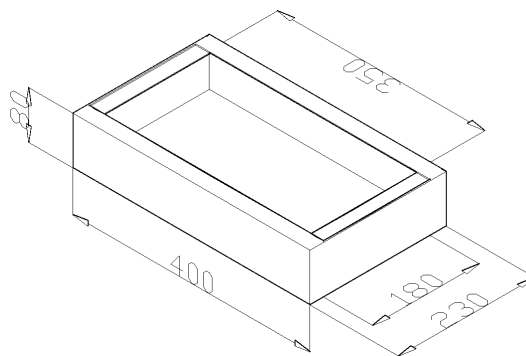
¹Podle *The American Heritage Dictionary of the English Language* se slovem šasi označuje: 3. Rám, na kterém jsou umístěny součástky rádia, televize nebo jiných elektronických zařízení (překlad).

Lepší je realizovat šasi částečně obdélníkového bokorysu a zavěsit jej na stropní desku (viz obrázek 3.1). V případě spojení s ovládacím panelem je nejvhodnější nechat vyrobit kompaktní plechovou skříňku, jejíž uzavřený prostor navíc sníží vliv vnějšího elektromagnetického rušení (obrázek 3.2, krabička bez vrchního víka).

Šrouby potřebné pro zavěšení nebo uchycení jsou se

- zápustnou hlavou s drážkou (DIN 963/A2) nebo křížovou drážkou (DIN 965/A2),
- zápustnou čtverečnou hlavou s drážkou (DIN 964/A4) nebo křížovou drážkou (DIN 966/A2).

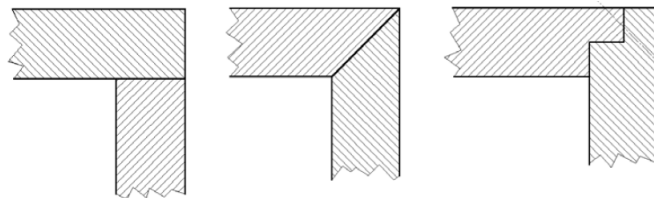
Jejich průměr a délka jsou závislé na konkrétním technickém uspořádání [13].



Obrázek 3.2: Nákres šasi jako uzavřené krabičky

3.2 Ozvučnice

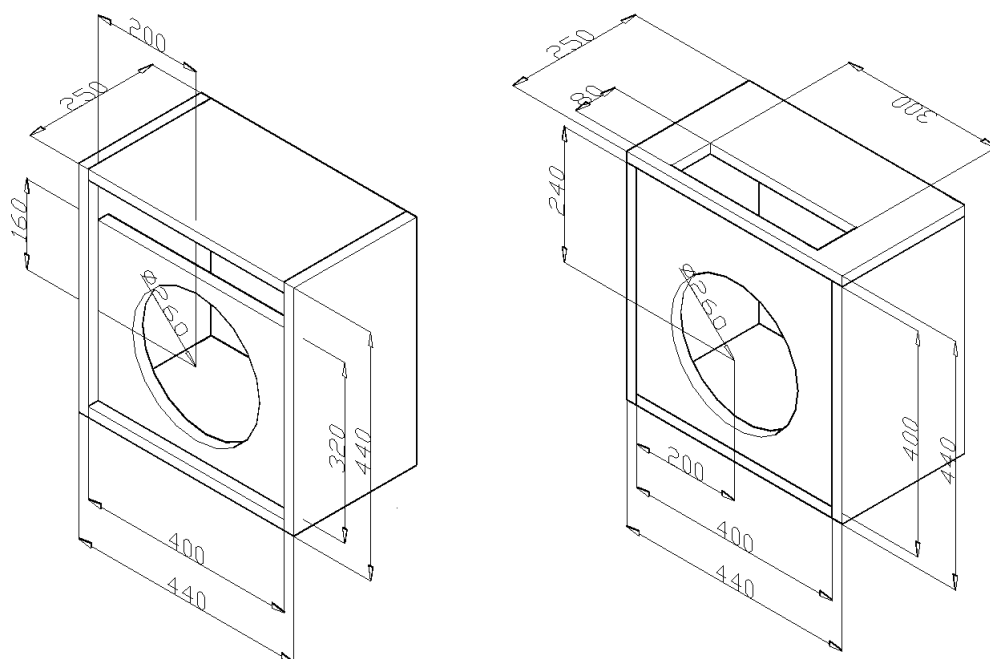
Ozvučnicové skříně lze vyrobit z dřevěného masivu, ale vzhledem k nehomogenní struktuře dřeva, jeho rezonančním schopnostem a vlhkostním změnám se takové konstrukce nedoporučují. Jistější je volit dřevotřískové desky, dřevovláknité desky nebo překližky.



Obrázek 3.3: Způsoby spojení desek [4]

Jednotlivé desky je možno spojovat na tupo, na pokos nebo na vložené polodrážky pomocí šroubů, kolíčků a lepení (obrázek 3.3). Z důvodu minimalizace pohybu jednotlivých částí ozvučnice musí být spojení co nejpevnější. Zpevnění konstrukce se dosahuje vyztužením hranolky v rozích skříně a spárováním případných netěsností mezi deskami.

Nejobvyklejší uspořádání otevřených boxů jsou na obrázku 3.4. Ovládací panel se umísťuje do čela nebo vrchu skříně (do přední, nebo zadní části) tak, aby byl co nejsnadněji přístupný. Knoflíky potenciometrů a další ovládací prvky by neměly přesahovat základní rozměry komba, aby při přemísťování nedošlo k jejich uražení.



Obrázek 3.4: Náčrty ozvučnice s čelním a vrchním ovládacím panelem

Ozvučnice vedle zjevného praktického účelu splňuje také funkci estetickou a firmy produkuje kytarové zesilovače se v současnosti snaží o svůj jednotný a identifikovatelný design². Povrch se upravuje vrstvou vinylu nebo imitací kůže různých barevných tónů (přispívá k odolnosti zařízení). Méně náročné je dýhování a nanášení laků. K ochraně reproduktoru se používá kovová mřížka či potah ze síťoviny nebo látky. Popisy na panelu jsou vytvořeny sítotiskem, nebo polepem fólií s motivem. Knoflíky a přepínače korespondují se vzhledem celého zařízení.

²Např. komba firmy Marshall spojují černá barva skříně se zlatou barvou panelu.

3.3 Reproduktor

Existuje více způsobů, jak upevnit reproduktor do čelní stěny skříně. Nejjednodušeji lze koš reproduktoru přišroubovat přímo nebo s použitím přitlačných podložek z pásoviny. Vložením gumového těsnění koš lépe přilne a nebude tak docházet k nežádoucím vibracím. Takové upevnění lze provést buď zvnějšku, nebo zevnitř.

V prvním případě vzniká problém při potahování čelní stěny plátnem, protože reproduktor není v úrovni desky a přesahuje. Druhý způsob je také do jisté míry nepříjemný, jelikož otvor v čelní desce vytváří krátký zvukovod, který akustické vlnění ovlivňuje.

Zapuštění koše je nejvýhodnější řešení a bohužel zároveň nejobtížnější, protože kruhový otvor se musí přesně vyfrézovat.

Reproduktor se zapojuje připájením dvojce stíněných barevně rozlišených kabelů³, které jsou vedeny otvorem ve spodku šasi na výstup výkonového zesilovače.

Stínění se uplatní u přívodního kabelu ze vstupního konektoru JACK, kde je akustický signál nejvíce náchylný na rušení, a dále při propojení jednotlivých DPS.



Obrázek 3.5: Reproduktor Legend 1058 od firmy Eminence

³Signálový vodič se většinou značí červenou barvou a signálová zem černou barvou.

Kapitola 4

Měření parametrů zkonstruovaného zařízení

4.1 Průběhy zkreslených signálů

Při konstrukci kombo zesilovače bylo použito zapojení zkreslujícího kanálu podle efektové krabičky Big Muff (viz 2.1.3). Na straně 42 následují průběhy signálů pořízené digitálním osciloskopem Handyscope HS3 připojeným k počítači přes USB.

Vstupní signál vytvořil funkční generátor přidružený k osciloskopu. Ve všech případech se jednalo o signál harmonický s frekvencí 800 Hz a amplitudou 400 mV¹.

První a třetí průběh odpovídá nejmenší a největší míře zkreslení, tj. při krajních polohách jezdce potenciometru². Druhý až čtvrtý dokládá vliv tónové korekce na výslednou podobu signálu, přičemž na obrázku 4.2 je dodatečné tvarování způsobeno HP a na obrázku 4.4 naopak DP.

U každého průběhu je rovněž uvedena vzorkovací frekvence, míra kvantování a dále přepočet napětí na dílky a přepočet času na dílky.

¹Frekvence 800 Hz je logaritmický střed akustického rozsahu reproduktoru a 400 mV přibližně odpovídá maximální úrovni signálu generovaného pasivní kytarou.

²Vzhledem k faktu, že potenciometr je zapojen jako dělič napětí, minimální úroveň zkreslení neodpovídá nulového odporu, nýbrž minimální nenulové hodnotě.

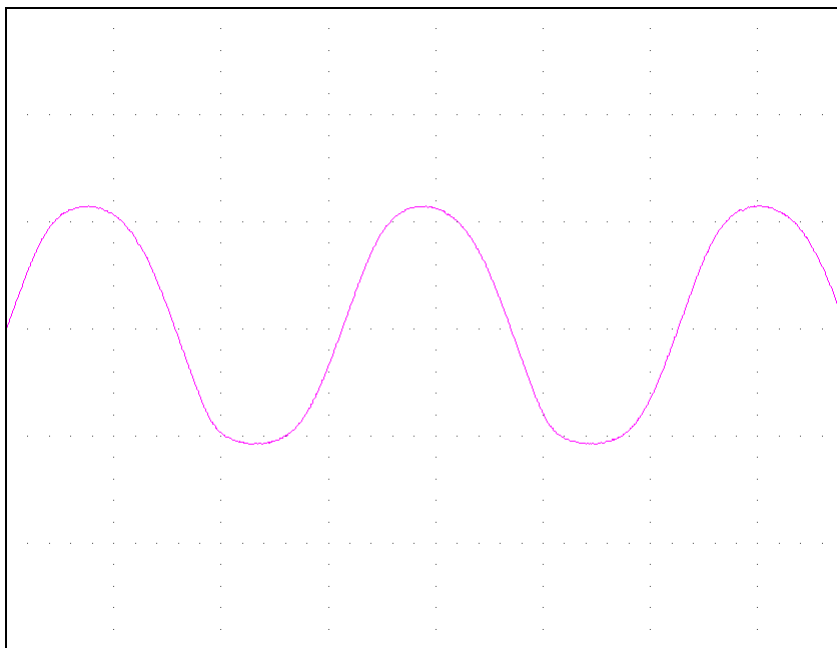
4.2 Naměřené parametry kytarového zesilovače

- Vstupní citlivost vyšší S_{inH} : 118 mV (82 mV_{RMS})
- Vstupní citlivost nižší S_{inL} : 1,8 V (1,3 V_{RMS})³
- Vstupní impedance předzesilovače Z_{in} : 315 kΩ⁴
- Korekce hloubek: ± 15,1 dB/100 Hz
- Korekce středů: ± 14,9 dB/800 Hz
- Korekce výšek: ± 15,3 dB/6000 Hz⁵
- Rozměry: 440 x 440 x 250 mm

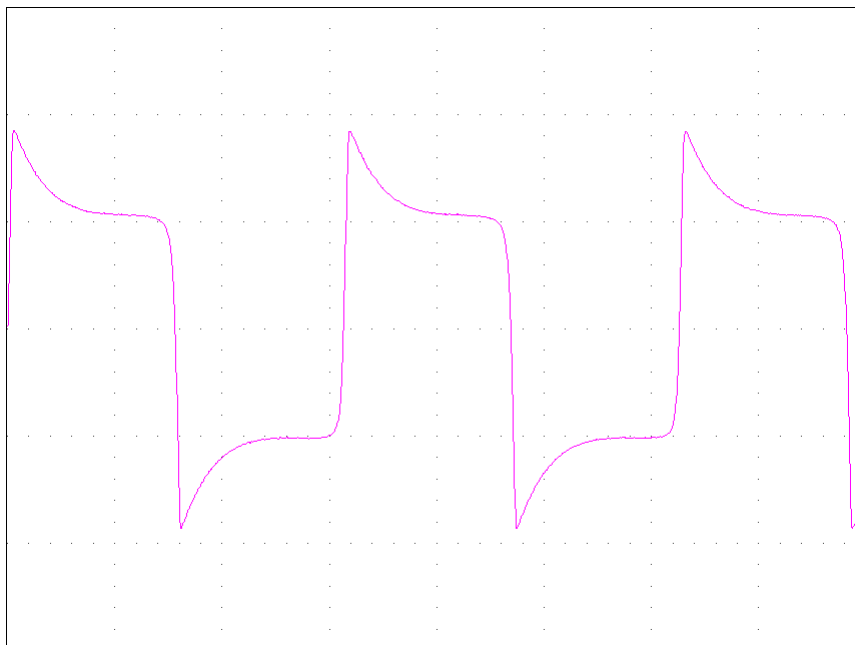
³Vstupní citlivosti S_{inH} a S_{inL} byly měřeny pro případ vstupní citlivosti výkonového zesilovače SPV 100P215+, tedy $S_P = 500$ mV pro $P_{out} = 100$ W/4 Ω.

⁴Vstupní impedance předzesilovače Z_{in} byla zjištěna pomocí napětí U_{gen} na výstupu funkčního generátoru proti zemi, známé hodnoty odporu předřazeného rezistoru R a napětí U na vstupu zesilovače (za rezistorem) proti zemi s využitím vztahu: $R_{in} = \frac{U}{U_{gen}-U} \cdot R$. V tomto měření se ztotožňuje impedance s odporem rezistoru.

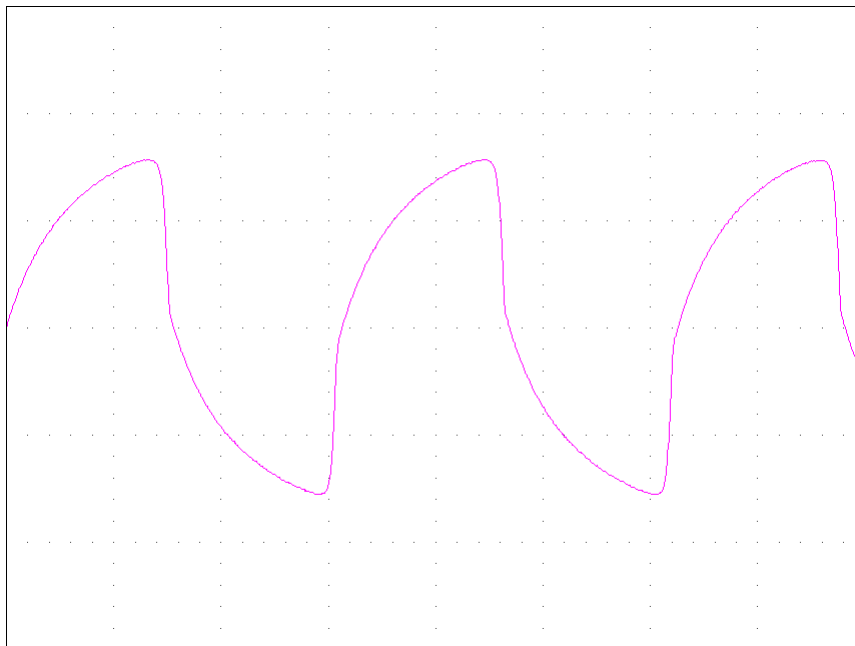
⁵Zesílení jednotlivých pásmových propustí bylo určeno s využitím prosté vizualizace signálu na osciloskopu, nikoliv pomocí konstrukce Bodeho grafu.



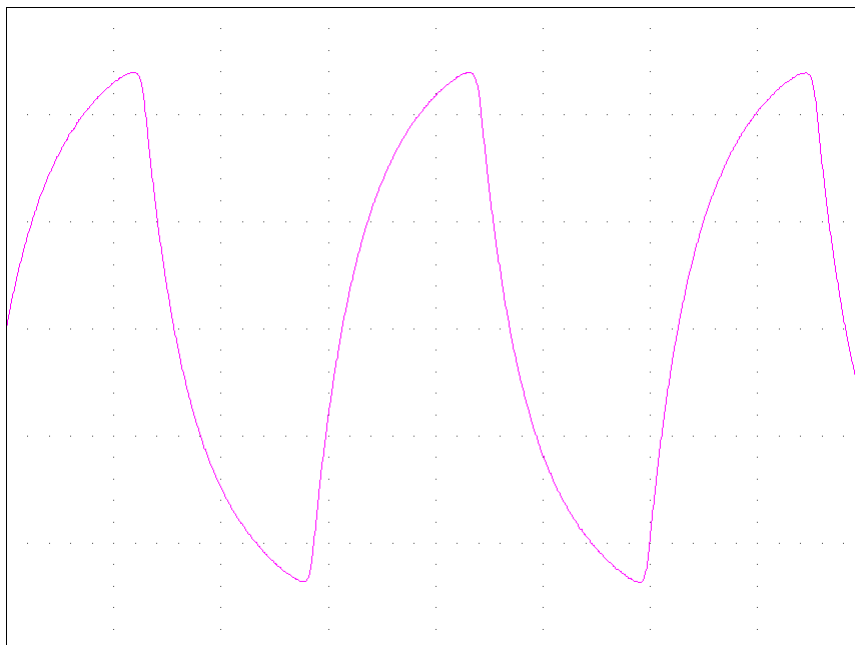
Obrázek 4.1: Průběh zkresleného signálu při maximálním vybuzení (100%), nízkém zkreslení (10%) a vyrovnané tónové korekci (50%) - 500MHz/2kS, 500mV/d, 400 μ s/d



Obrázek 4.2: Průběh zkresleného signálu při maximálním vybuzení (100%), maximálním zkreslení (100%) a nevyrovnané tónové korekci (0%) - 500MHz/2kS, 500mV/d, 400 μ s/d



Obrázek 4.3: Průběh zkresleného signálu při maximálním vybuzení (100%), maximálním zkreslení (100%) a vyrovnané tónové korekci (50%) - 500MHz/2kS, 500mV/d, 400 μ s/d



Obrázek 4.4: Průběh zkresleného signálu při maximálním vybuzení (100%), maximálním zkreslení (100%) a nevyrovnané tónové korekci (100%) - 500MHz/2kS, 500mV/d, 400 μ s/d

Závěr

Účel této bakalářské práce byl vytvořit souhrn základních informací, prostřednictvím kterých by člověk s elektrotechnickým vzděláním byl schopen postavit kytarový kombo zesilovač. Součástí práce byla i vlastní konstrukce zařízení.

Stať o parametrech kytarového zesilovače (kapitola 1) má čtenáře seznámit s problematikou. Jejím úkolem je vyvolat povědomí o vysvětlovaných pojmech, které případní zájemci o audioelektroniku využijí na počátcích svého studia.

Druhá kapitola, byť nejdelší v této práci a ve shodě se zadáním, nabízí více možností řešení jednotlivých zapojení, avšak nejedná se o všeobsažnou učebnici. Podobně text popisující neelektrické části a dávající představu o tom, jak se ozvučnice kytarových komb konstruuji, již například nezmiňuje, zdali je k úpravě povrchu výhodnější vinyl nebo imitace kůže. Rozsah práce to prostě nedovoluje.

Konstrukce samotného zařízení vycházela z údajů v této práci a byla prováděna takovým způsobem, aby odpovídala bezpečnostním předpisům. Šasi bylo několikrát vodivě pospojeno a pomocí napájecí šňůry uzemněno přes vodič PE.

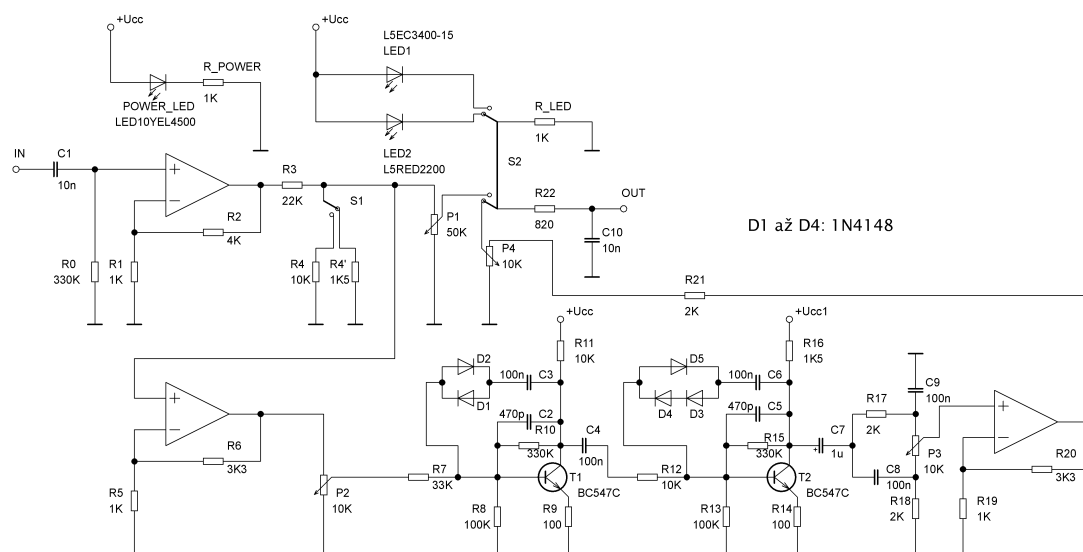
Přívodní kabely připojené na primární vinutí transformátoru byly opatřeny dodatečnou izolací, stejně jako kabely sekundárního vinutí napájející desku výkonového zesilovače. Rovněž transformátor byl již od výroby vícenásobně izolován. K dodatečnému jištění byla použita skleněná přístrojová pojistka. Všechny signálové cesty byly odstíněny.

Předzesilovač a ekvalizér byl záměrně realizován na dvou deskách, tak aby byla v budoucnosti možná případná výměna jedné desky bez nutnosti výměny obou obvodů. Kvalita nezkresleného zvuku kytarového kombo zesilovače odpovídá konstrukčnímu řešení i očekávání a pro začínajícího kytaristu je více než dostačující. Ekvalizér poskytuje výraznou až lehce nadbytečnou úroveň korekce ve třech pásmech. Díky ovládacím prvkům zkreslující kanál nabízí větší množství různě tvarovaných signálů.

Dodatek A

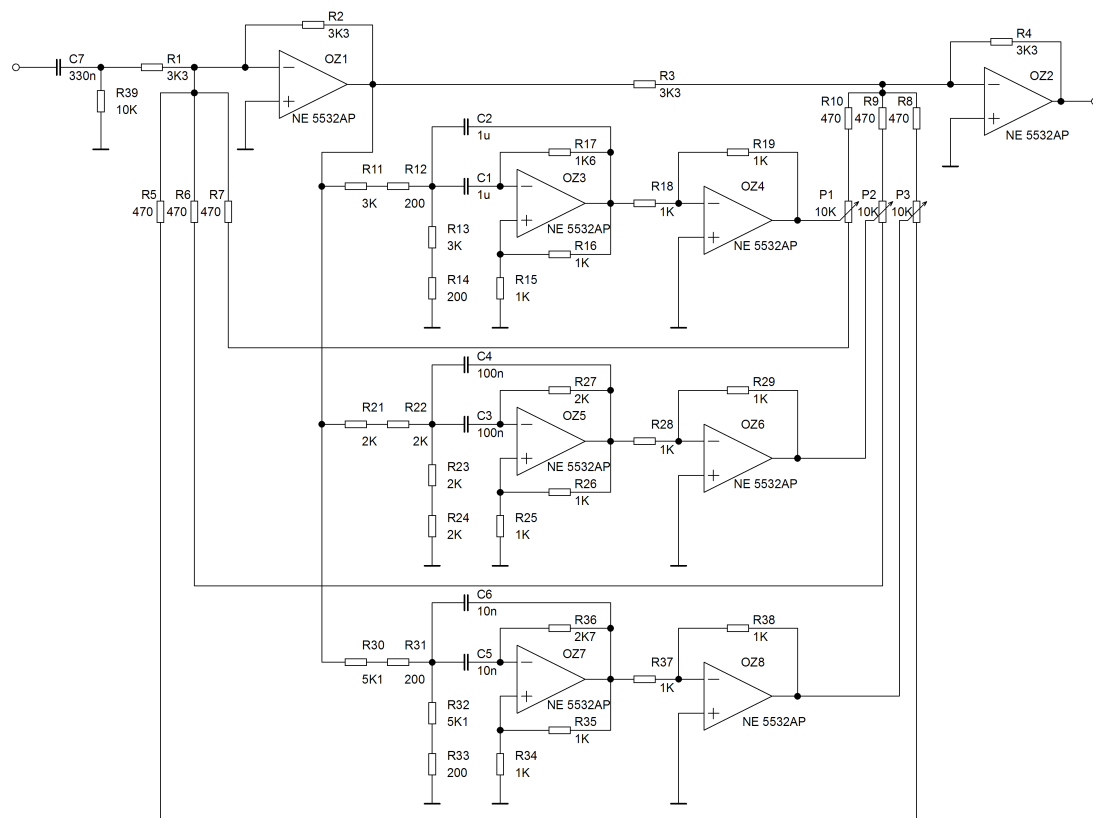
Úplná schémata zapojení

A.1 Předzesilovač



Obrázek A.1: Schéma dvoukanálového předzesilovače

A.2 Ekvalizér

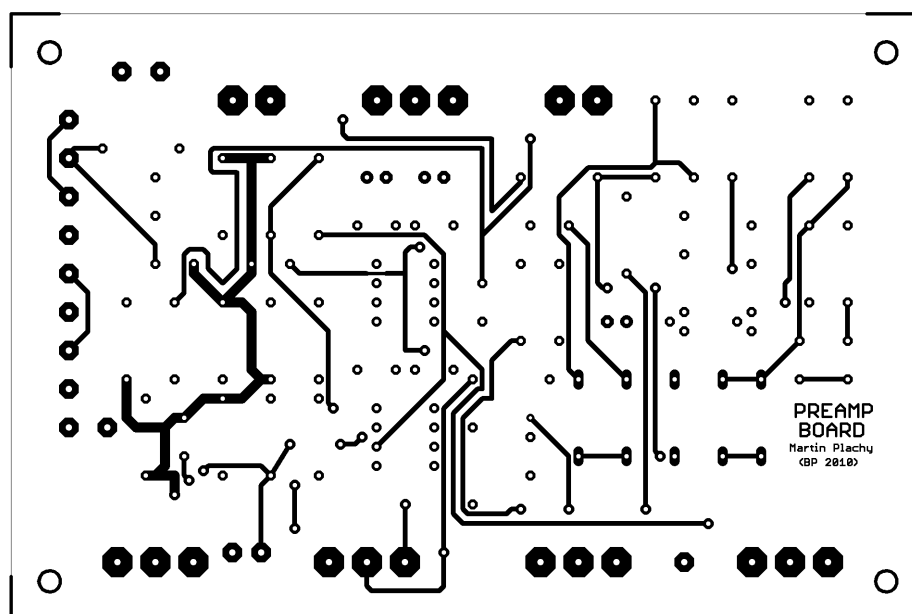


Obrázek A.2: Schéma třípásmového ekvalizéru

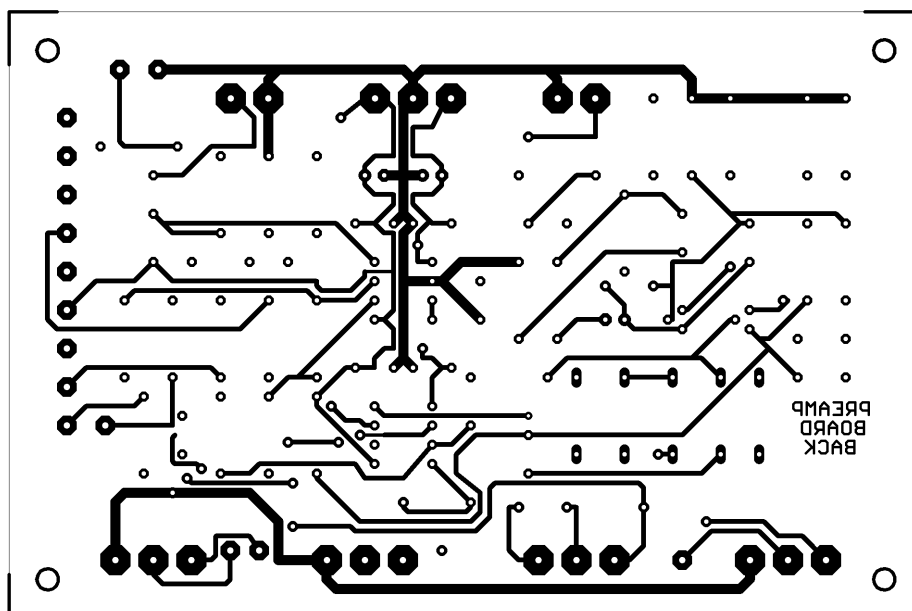
Dodatek B

Předlohy DPS

B.1 Předzesilovač

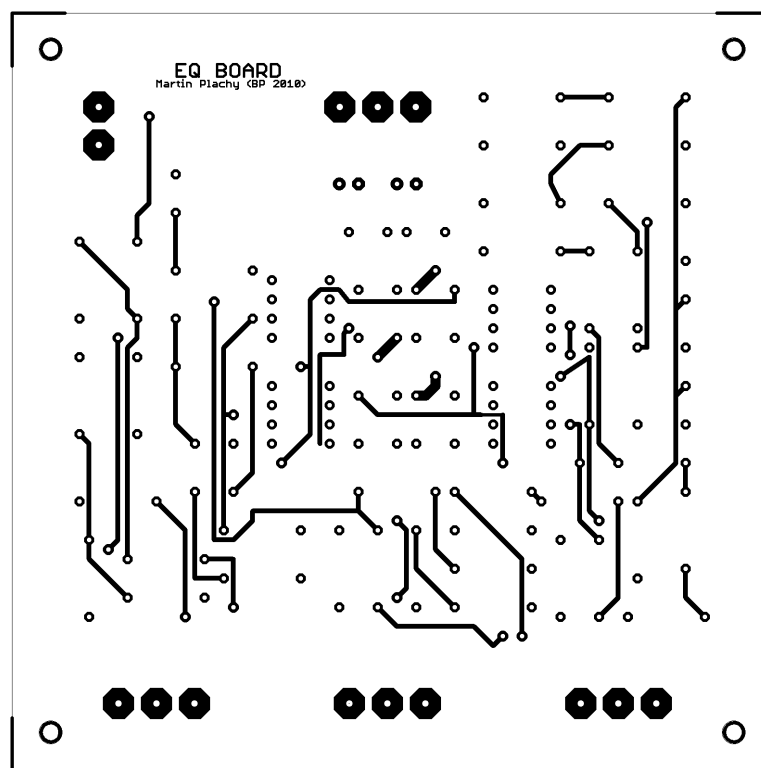


Obrázek B.1: Předloha vrchní strany DPS předzesilovače (měřítko 1:1)

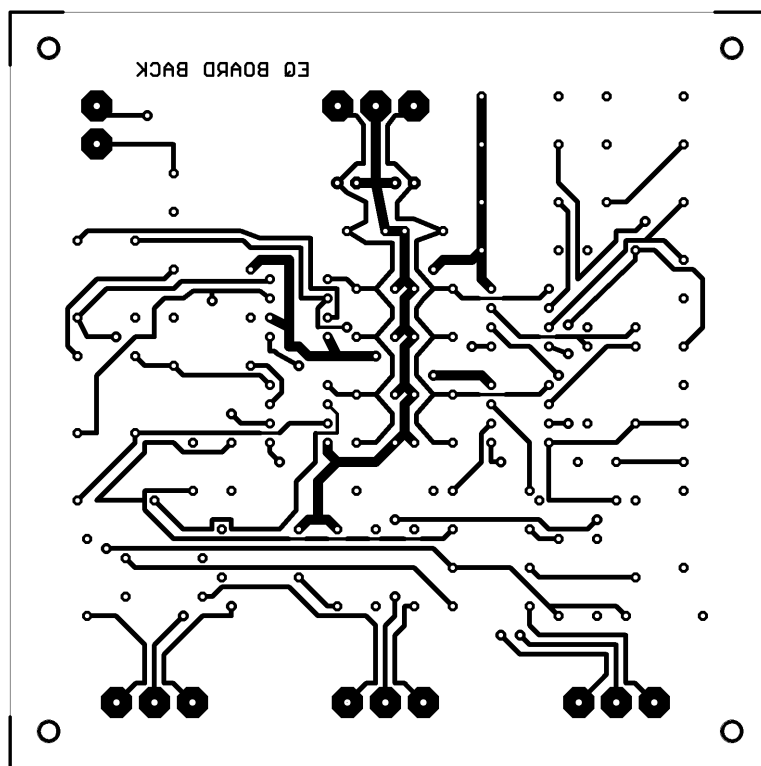


Obrázek B.2: Předloha spodní strany DPS předzesilovače (měřítko 1:1)

B.2 Ekvalizér



Obrázek B.3: Předloha vrchní strany DPS ekvalizéru (měřítko 1:1)

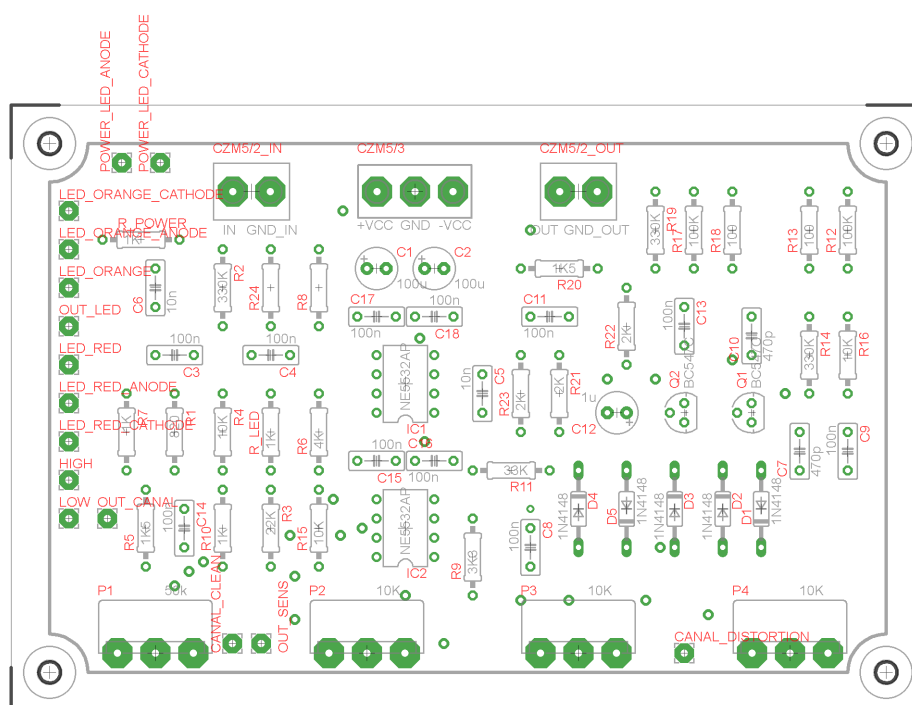


Obrázek B.4: Předloha spodní strany DPS ekvalizéru (měřítko 1:1)

Dodatek C

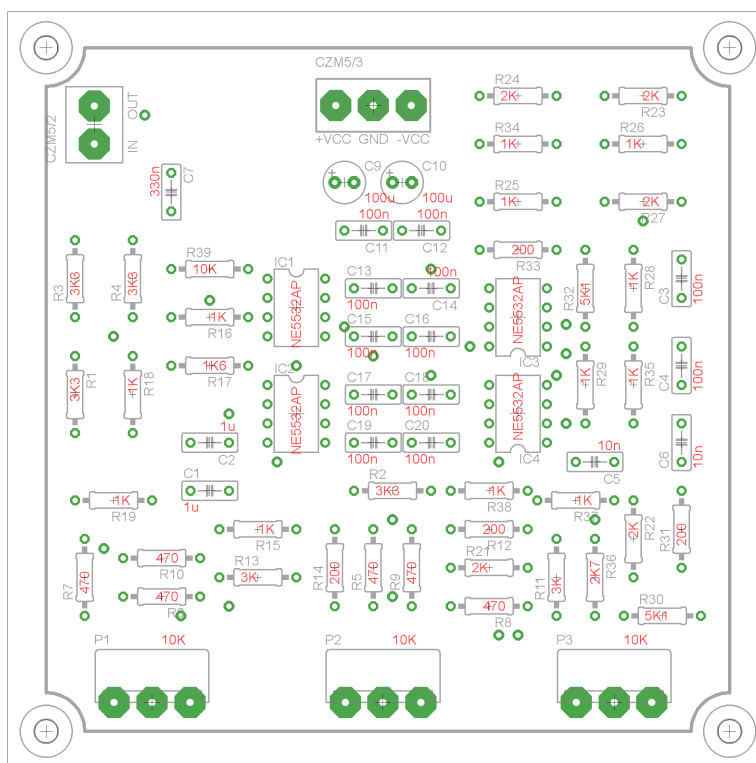
Osazovací výkresy

C.1 Předzesilovač



Obrázek C.1: Osazovací výkres DPS předzesilovače (měřítko 1:1)

C.2 Ekvalizér



Obrázek C.2: Osazovací výkres DPS ekvalizéru (měřítko 1:1)

Dodatek D

Soupisky součástek

Součástky ekvalizéru			
Název	Označení součástky	Hodnota	Množství
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R1, R2, R3, R4	3K3	4 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R5, R6, R7, R8, R9, R10	470	6 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R11, R13	3K	2 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R12, R14, R31, R33	200	4 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R15, R16, R18, R19	1K	4 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R25, R26, R28, R29	1K	4 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R34, R35, R37, R38	1K	4 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R17	1K6	1 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R21, R22, R23, R24, R27	2K	5 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R30, R32	5K1	2 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R36	2K7	1 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R39	10K	1 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C1, C2	1u	2 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C1, C2, C11, C12	100n	4 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C13, C14, C15, C16	100n	4 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C17, C18, C19, C20	100n	4 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C5, C6	10n	2 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C7	330n	1 ks
Kondenzátor elektrolytický radiální	C9, C10	100u	2 ks
Potenciometr vrstvový	P1, P2, P3	10K (N)	3 ks
Zesilovač operační	IC1, IC2, IC3, IC4	NE5532 AP	4 ks
Svorky do plošných spojů	CZM5/2	—	1 ks
Svorky do plošných spojů	CZM5/3	—	1 ks

Součástky předzesilovače			
Název	Označení součástky	Hodnota	Množství
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R1	820	1 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R2, R14, R19	330K	3 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R3	22K	1 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R4, R15, R16	10K	3 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R5, R20	1K5	2 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R6	4K	1 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R7, R10, R24	1K	3 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R8, R9	3K3	2 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R11	33K	1 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R12, R17	100K	2 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R13, R18	100	2 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R21, R22, R23	2K	3 ks
Rezistor metalizovaný miniaturní – typ R0207	R_LED, R_POWER	1K	2 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C3, C4, C8, C9, C11	100n	5 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C13, C14, C15	100n	3 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C16, C17, C18	100n	3 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C5, C6	10n	2 ks
Kondenzátor keramický TK .../50V	C7, C10	470p	2 ks
Kondenzátor elektrolytický radiální	C1, C2	100u	2 ks
Kondenzátor elektrolytický radiální	C12	1u	1 ks
Potenciometr vrstvový	P1	50K (G)	1 ks
Potenciometr vrstvový	P2, P3	10K (N,G)	2 ks
Potenciometr vrstvový	P4	10K (G)	1 ks
Zesilovač operační	IC1, IC2	NE5532 AP	2 ks
Dioda univerzální křemíková	D1, D2, D3, D4, D5	1N4148	5 ks
Tranzistor NPN univerzální	T1, T2	BC547C	2 ks
Svorky do plošných spojů	CZM5/2	—	2 ks
Svorky do plošných spojů	CZM5/3	—	1 ks

Ostatní důležité součástky			
Název	Označení součástky	Hodnota	Množství
LED žlutá	POWER_LED	LED10YEL 450	1 ks
LED oranžová	LED1	L5EC340015	1 ks
LED červená	LED2	L5RED2200	1 ks
Konektor napájecí s držákem pojistek	EURO13 VPJ	—	1 ks
Konektor JACK	JACK 6.3 ZVJ MN	—	1 ks
Držák LED panelový, $\varnothing 10$ mm	REF10-M	—	1 ks
Držák LED panelový, $\varnothing 5$ mm	REF5-M	—	2 ks
Přepínač páčkový, 1 pól, 1A/250V	TS14	—	1 ks
Přepínač páčkový, 2 póly, 1A/250V	TS25	—	1 ks
Přepínač kulatý kolébkový, 3A/250V	SR15MINI 01 BLK	—	1 ks
Sloupek distanční z polystyrolu, L = 10 mm	KDR 10	—	12 ks
Kryt plastový na FASTON	KRYT6.3-WHT	—	5 ks

Literatura

- [1] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [2] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektrotechnice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-901984-3-0.
- [3] HÁJEK, K. – SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7.
- [4] SÝKORA, Bohumil. *Stavíme reproduktorové soustavy (XIL)*. Praktická elektronika (A Radio). 2/2001
- [5] RICHTER, Antonín. *TS parametry reproduktoru - význam a výpočty* [online]. Naposledy aktualizováno 21. listopadu 2009 [cit. 2010-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.audioweb.cz/tp-tsparametry.htm>>
- [6] HUNTER, Dave. *Tone Tips: Speaker Cabinets* [online]. Naposledy aktualizováno 15. března 2008 [cit. 2010-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.gibson.com/en-us/Lifestyle/Features/>>
- [7] SALMINEN, Rikupetteri. *Cook Yoour Own Distortion* [online]. [cit. 2010-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.generalguitargadgets.com/richardo/distortion/index.html>>
- [8] BELZA, Jaroslav. *AC mains LED indicator* [online]. [cit. 2010-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.belza.cz/ac-led/kontrol.htm>>
- [9] *ALDAX - Electronics by Sinclair&Pierre* [online]. [cit. 2010-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.aldax.cz/index.php?tab=1&show=spv100>>

- [10] *e-obchod EZK - elektronika Zdeněk Krčmář* [online]. [cit. 2010-04-17]. Dostupný z WWW:
<<http://www.ezk.cz/e-shop/select.php?skupina=2&rozsah=1>>
- [11] *NE5532 Datasheet - Dual Low-Noise Operational Amplifier - Texas Instruments*
[online]. [cit. 2010-04-09]. Dostupný z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/N/E/5/5/NE5532AP.shtml>
- [12] *TDA1524 Datasheet - Stereo-Tone/Volume Control Circuit - Phillips*
[online]. [cit. 2010-04-09]. Dostupný z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/D/A/1/TDA1524.shtml>
- [13] *Spojovací materiál a hutní materiál nerez, e-obchod* [online]. [cit. 2010-05-11].
Dostupný z WWW: <<http://www.akros.cz/>>
- [14] *Eminence - The Art and Science of Sound* [online]. [cit. 2010-03-21]. Dostupný z WWW:
<<http://www.eminence.com/resources/works.asp>>
- [15] *Eminence - The Art and Science of Sound* [online]. [cit. 2010-03-21]. Dostupný z WWW:
<<http://eminence.com/pdf/legend-1518.pdf>>
- [16] *Fender Products: FrontmanTM 65R* [online]. [cit. 2010-03-26]. Dostupný z WWW:
<<http://www.fender.com/products/search.php?partno=2316000010>>
- [17] *Kustom* [online]. [cit. 2010-03-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.kustom.com>>